

Forschungsbericht

2022



Liebe Leserin, lieber Leser,

im Ihnen vorliegenden 12. Forschungsbericht der OTH Amberg-Weiden blicken wir auf die Themen und Inhalte des anwendungsorientierten Wissens- und Technologietransfers zwischen unserer Hochschule und ihren Partnern in Wirtschaft und Gesellschaft im Jahr 2021 zurück. Neben dem Auftrag, in der Nördlichen und Mittleren Oberpfalz attraktive, bedarfs- und damit zukunftsorientierte Studiengänge anzubieten, ist es ein wichtiges Ziel, über die praxisnahe Forschung und Entwicklung bzw. den Austausch von Know-how Innovationen auszulösen und die Wettbewerbsfähigkeit unserer Hochschulregion zu unterstützen. Getreu unserem Leitsatz: „Durch Denken Bewegen – Mit Wissen Wirken“.

Als Technische Hochschule ist der Anwendungs- und Praxisbezug in Studium, Lehre, Weiterbildung und Forschung sowohl Kernelement als auch Markenzeichen. Dies dient auch unseren Studierenden und Absolvierenden, die auf diese Weise bereits während des Studiums – sei es in Projektarbeiten, Praxissemestern oder ihren Bachelor- und Masterarbeiten – einen engen Bezug zu potentiellen Arbeitgebern und damit zum späteren Berufsleben aufbauen. Begleitend erfolgt über die Einbindung des wissenschaftlichen Nachwuchses in unsere Forschungsprojekte eine Weiterqualifizierung bis hin zum Weg in ein Promotionsverfahren in einem der Verbundkollegs des Bayerischen Wissenschaftsforums BayWISS, in die wir eingebunden sind. Und nicht zuletzt sorgen anwendungsorientierte Forschungsprojekte mit den dadurch eingeworbenen Drittmittel für eine (Re-)Finanzierung unserer Forschungsinfrastruktur und des wissenschaftlichen Nachwuchses. Mit einem Drittmittelvolumen von jährlich rund 7,5 Millionen € belegen wir die Forschungsstärke der OTH Amberg-Weiden.

Die über 30 Projekte, die wir Ihnen im Forschungsbericht 2022 vorstellen, zeigen in den Kompetenzfeldern Technik, Wirtschaft und Gesundheit die Bandbreite

Dear Reader,

In the 12th research report of the Technical University of Applied Sciences Amberg-Weiden (OTH), we reflect upon the topics and content of the application-oriented knowledge and technology transfer between our university and its business and society partners in 2021. In addition to the primary mission of offering attractive, needs-oriented and thus cutting-edge degree programmes in the Northern and Central Upper Palatinate, it is also an increasingly important to initiate innovation and foster our university region's competitiveness through practice-oriented research and development and the exchange of expertise. Unsurprisingly, these focal points align with our guiding principle: *Moving minds – applying science*.

The practical relevance and application of knowledge, teaching, further education and research are both a fundamental component and signature feature of the Technical University of Applied Sciences. This also serves well our students and graduates, who, during their studies build lasting and close relationships with potential employers – be it in project work, internship semesters or during their Bachelor's and Master's theses – in turn laying the ground work for their later professional life. At the same time, the integration of young academics into our research projects leads to further qualification and can lead to doctoral programmes in one of the BayWISS Bavarian Science Forum colleges, in which we participate. Last but certainly not least, third-party funds raised through application-oriented research projects, provide (re)financing for our own research infrastructure and young generation of scientists. With an annual third-party funding volume of around € 7.5 million, attests to the research performance of OTH Amberg-Weiden.

The more than 30 projects presented in the 2022 Research Report demonstrate the scope of our R&D activities in the core areas of Technology, Business and Healthcare.

unserer F&E-Aktivitäten. Die Beiträge sind nach den Kernthemen Digitalisierung, Energie und Mobilität, Information und Kommunikation, Lebenswissenschaften und Ethik, Produktion und Systeme sowie Sensorik strukturiert und damit zu Clustern von Technologiefeldern zusammengefasst.

Unser Ziel ist, noch mehr in partnerschaftlichen Netzwerken zu denken und zu handeln, denn Kooperationen und Netzwerke sind der Weg in die Zukunft. Wir erfahren an der OTH Amberg-Weiden eine breite Unterstützung seitens unserer Partner aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, insbesondere im PartnerCircle (mit heute 32 Unternehmen), in 20 Innovativen Lernorten mit Wirtschaft und Gesellschaft, über unseren Technologie-Campus an der OTH Amberg-Weiden e.V., der die kommunalen Gebietskörperschaften einbindet, oder auch durch die Unternehmen, die sich im Dualen Studium engagieren.

In diesem Sinne wollen wir die an unserer Hochschule etablierten Kooperationsmodelle noch enger zusammenführen, um zusätzliche Synergieeffekte auszulösen. Und wir sind offen für weitere, neue Ideen, gerne aus allen Ebenen der Praxis.

Der Schulterchluss zwischen der OTH Amberg-Weiden und unserer Hochschulregion wird auch durch die erneute finanzielle Unterstützung des vorliegenden Forschungsberichtes über Präsentationen von Partnern verdeutlicht, wofür wir uns sehr herzlich bedanken!

Wir wünschen Ihnen eine informative und spannende Lektüre des Forschungsberichtes 2022 der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden!

The contributions are structured according to the central research topics of Digitalisation, Energy and Mobility, Information and Communication, Life Sciences and Ethics, Production and Systems and Sensor Technology, and are grouped according to technology clusters.

Our continued objective is to engage in even more partnership-based networking, because cooperation and collaboration are the way forward. At our university, we experience wide-reaching support from our partners in business, politics and society, especially through our PartnerCircle (with 32 companies today) and in 20 innovative learning sites located in the community. This collaborative network is additionally evidenced in our Technology Campus at OTH Amberg-Weiden e.V., which involves municipal authorities, or through the companies participating in the dual study programme.

Within this context, we aim to bring our university's established cooperation models more closely together in order to unleash further synergies. As such, we are open to fresh ideas, and collaboration, gladly from all areas of professional practice.

The cooperative bond between the OTH Amberg-Weiden and the university region is also clearly reflected in the continued financial support of this research report shown via presentations by these esteemed partners. For this support, we would like to express our heartfelt gratitude.

Wishing you an informative and interesting read of the Technical University of Applied Sciences Amberg-Weiden 2022 Research Report.

Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Präsident der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Weber

Leiter Institut für Angewandte Forschung IAF

Vorwort/Preface	1	Energiesystemmodellierung in Anwendung und Forschung	35
Digitalisierung		Laura Weber, M.Eng.	
Prüfstand zur flexiblen Simulation rotierender mechanischer Lasten	6	Patrick Dirr, M.Eng.	
Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck		Regina Trötsch, M.Eng.	
Hauke Nannen, M.Sc.		Prof. Dr. Raphael Lechner	
Prof. Dr.-Ing. Heiko Zatocil		Prof Dr.-Ing. Markus Brautsch	
Numerische Modellierung des Wärme- und Stofftransports in AlN-Pulvern einschließlich chemischer Reaktionen	12	Testszenarien zur Evaluierung autonomer Fahrzeuge	41
Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke		Daniel Scharf, M.Sc.	
Shiva Krishna Tangedipelli, M.Sc.		Katharina Stein, M.Eng.	
Dipl.-Phys. Andreas Lesnik		Seifeddine Saadani, M.Eng.	
Dr. Boris Epelbaum		Heike Lepke, M.Eng.	
Dr.-Ing. Stephan Müller		Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
KI-basierte Optimierung von Daten-Pipelines	17	AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum	47
Ruben Prokscha, M.Sc.		Roman Babl, B.Eng.	
Mathias Schneider, M. Eng.		Fabian Zeitler, B.Eng.	
Seifeddine Saadani, M. Eng.		André Baldermann, M.Eng.	
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß		Josef Schmid, M.Sc.	
Cloning Optical Physical Unclonable Functions Using Machine Learning Attacks	24	Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
Leah Lathrop, M.Sc.		PRYSTINE – Programmierbare Systeme für Intelligenz in Automobilen	52
Prof. Dr. Andreas Aßmuth		Josef Schmid, M.Sc.	
Prof. Matthias Söllner		Christian Reil, M.Eng.	
		Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß	
Energie und Mobilität		Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe – eine nachhaltige Herausforderung für Hochschulen und Industrie	57
Optimierung der Energiewandlungskette von Kleinwindenergieanlagen (KWEA)	29	Prof. Dr. Peter Kurzweil	
Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer			

Information und Kommunikation

Industrial Internet Things:

Effiziente Vernetzung dezentraler Intelligenz61

Oleksandr Volodin, M.Eng.
Katharina Lutter
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

Neuerungen bei Zertifizierung in der Industrieautomatisierung – Von TSN zu Advanced Physical Layer..... 68

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

Robuste Signalverarbeitungsmethoden für

Multidrop-Konzepte in industrieller Umgebung..... 71

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

Lebenswissenschaften und Ethik

IoT im

Gesundheitswesen.....75

Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
Josefine Rößle-Kress, Ass. Jur.
Juliana Hartig, M.A.
Michael Gleißner, B. Eng.
Petra Thomas
Ann-Christin Schleser, B. Eng.
Sabrina Richtmann, M.A.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Robotik und Automatisierung

im Gesundheitswesen81

Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
Philip Bertelshofer, M.Sc.
Nico Humig, M.Sc.
Venkata Sai Prithvi Raj Thipparaju, M.Sc.
Ann-Christin Schleser, B. Eng.
Sabrina Richtmann, M.A.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Hygiene und Medizintechnik –

Neue Technologien zur Vermeidung von Infektionen.... 89

Dr. rer. nat. Sebastian Buhl
Alexander Stich, M.Sc.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Einsatz von Thermolumineszenzdosimetrie (TLD) zur Personendosimetrie bei der selektiven internen Radiotherapie (SIRT) – Möglichkeiten und Limits..... 95

Dr.-Ing. Philipp Ritt
Michael Mark, M.Sc.
Agnes Pöllmann, M.Sc.
Prof. Dr. med. Torsten Kuwert
Prof. Dr. Ralf Ringler

Adaptation des Laserlichtschnittverfahrens zur Nutzung für Multi-Objektmessung 101

Stefan Ziegler, M.A.
Christina Schäfer
Prof. Dr. Ralf Ringler

In-vitro-Bestimmung der Organdosis in der nuklearmedizinischen Diagnostik mittels Thermolumineszenzdosimetrie106

Agnes Pöllmann, M.Sc.
Michael Mark, M.Sc.
Dr.-Ing. Philipp Ritt
Prof. Dr. med. Torsten Kuwert
Prof. Dr. Ralf Ringler

Bestimmung der Form- und Größenunterschiede des Femurs anhand von segmentierten CT-Datensätzen zur patientenspezifischen Planung einer Hüfttotalendoprothese unter Berücksichtigung biomechanischer Aspekte 112

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

Arsen: vom Lifestyle-Element zur Umweltlast..... 116

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

Kanwan: Chemische Analyse eines essbaren Steins aus Kamerun.....120

Christian H. Pevoubou Kaffo
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell
Susanne Bradfish, CTA
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Unternehmensführung in Zeiten der Corona Pandemie und die Suche nach dem “New Normal” in der Arbeitsorganisation..... 125

Prof. Dr. Frank Schäfer

Produktion und Systeme

**Skalierbare Simulationsansätze
für die numerische Schweißsimulation130**
Prof. Dr. Franz Magerl

**Windkanaluntersuchungen an einem generischen,
modularen Fahrzeugmodell, aufgebaut in 3D-Druck ... 135**
Ioan-Bogdan Dinica, B.Eng.
Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth
Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß

**Biorefinery concepts exemplified
by the cyanobacterium Arthrospira platensis 139**
Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger
Fabian Boßle, M.Sc.
Sun-Hwa Jung, M.Sc.
Niklas Zell, M.Eng.

**Ultrakurzpuls-Laserbearbeitung
von transparenten Kunststoffen 145**
Thomas Simson, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Koch
Dr.-Ing. Bernhard Schmitt

**Aggregierte Kennzahl
zur Bewertung der Ressourceneffizienz 150**
Prof. Dr. Mario Mocker
Markus Bär, M.Eng.

Sensorik

**Pseudocapacitance and Aging Phenomena
of Electrochemical Capacitors 155**
Prof. Dr. Peter Kurzweil
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell

**Instrumentelle Analytik: Verdrängungseffekte
in Aktivkohleschüttungen bei der Abluftreinigung160**
Dipl.-Phys. Christian Schell
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

**Chemometrische Wasseranalytik
mit FTIR-Spektroskopie166**
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell
Christof Dinkelbach
Christian Gradl, B.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

**Computerchemie: Intelligente Absorptionsspektroskopie
mit numerischen Methoden..... 172**
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Niklas Zell, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

**Nanoparticles in Electrochemical Sensors:
Toxicological Risk Assessment by Flow Cytometry..... 178**
Prof. Dr. Peter Kurzweil
Dr. rer. nat. Christina Janko

Studienangebot der OTH Amberg-Weiden182

Inserentenverzeichnis183

Impressum.....184

Prüfstand zur flexiblen Simulation rotierender mechanischer Lasten

Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck
Hauke Nannen, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Heiko Zatocil

Zusammenfassung

Ein Prüfstand zur Simulation unterschiedlicher mechanischer Last wurde fakultätsübergreifend geplant und umgesetzt. Die Simulation des Lastmoments wird über einen Lastmotor abgebildet, wohingegen das Massenträgheitsmoment über einen variabel einstellbaren Massenträgheitsprüfstand umgesetzt wird. Dieser basiert auf rotierenden Massen. Durch die Konstruktion der Mechanik können die aktiven Massen spielfrei, einfach, schnell und flexibel eingestellt werden.

Abstract

A test bench for simulation of different mechanical loads was developed by members of the faculties MB/UT and EMI of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. A synchronous motor simulates the load torque whereas a special device provides a variable adjustment of mass moment of inertia. With this special device it is possible to adjust simply, fast, flexibly, and free from clearance the mass moment of inertia. Since this device is based on mechanical discs in contrast to a simulation of dynamic torque that is dependent on the angular acceleration any oscillations can be avoided effectively. The practicability of the test bench was proven during various measurements for scientific publications.

1 Einleitung

In vielen Applikationen und Maschinen stellen elektrische Antriebe eine wesentliche, wenn nicht gar die wichtigste Komponente dar – sei es der einfache Elektromotor, der eine Pumpe antreibt, der hochdynamische Servoantrieb in einer Werkzeugmaschine oder der Traktionsmotor in einem Elektroauto. Elementare Eigenschaft des elektrischen Antriebs ist die Wandlung elektrischer Energie in mechanische Energie (motorischer Betrieb), oder andersherum (generatorischer Betrieb).

Befindet sich der elektrische Antrieb im stationären Zustand, wird er also bei konstanter Drehzahl und Lastmoment betrieben, nimmt die angeschlossene Mechanik die vom Motor bereitgestellte mechanische Energie auf und gibt diese, abzüglich der Verluste z. B. durch Reibung, an

den jeweiligen Prozess ab (z. B. Pumpen von Wasser aus einem Brunnen). Ändert jedoch der Antrieb seine mechanische Drehzahl, z. B. während eines Beschleunigungsvorgangs, wird ein Teil der Energie zudem zur Beschleunigung der trägen Masse benötigt. Analog zur Newtonschen Bewegungsgleichung lassen sich diese Zusammenhänge für rotatorische Systeme wie folgt beschreiben:

$$\sum M = J \cdot \alpha \quad (1)$$

$$M_{\text{Motor}} - M_{\text{Last}} = J \cdot \alpha \quad (2)$$

$$M_{\text{Motor}} = J \cdot \alpha + M_{\text{Last}} \quad (3)$$

worin M_{Motor} das vom Elektromotor aufgebraachte Drehmoment, M_{Last} das Drehmoment der Last, J das gesamte resultierende Massenträgheitsmoment des Antriebs und der Applikation an der Motorwelle und α die resultierende Winkelbeschleunigung der Motorwelle beschreiben.

Soll das Verhalten eines Antriebs in verschiedenen Betriebspunkten im Labor untersucht werden, muss die Applikation mit ihrem charakteristischen Drehmoment M_{Last} und dem typischen Massenträgheitsmoment J i. d. R. nachgebildet werden, da diese häufig nicht im Labor verfügbar ist. Man spricht auch von einer sogenannten Lastsimulation oder auch -nachbildung.

Im Folgenden wird eine flexible Lastnachbildung vorgestellt, die in Zusammenarbeit mit der Fakultäten Maschinenbau/Umwelttechnik (MB/UT) und Elektrotechnik, Medien und Informatik (EMI) entstanden ist und im Labor für Elektrische Maschinen und Antriebe der Fakultät EMI aufgebaut und bereits erfolgreich in Forschungsprojekten eingesetzt wird.

2 Herausforderungen und Zielsetzung

Zur Nachbildung der Last müssen die beiden Terme rechts des Gleichheitszeichens in Gleichung (3) in Echtzeit berechnet und ohne Zeitverzug umgesetzt werden. Nur so kann eine adäquate Lastsimulation gewährleistet und damit ein realistischer Betrieb des Antriebs nachgestellt werden.

Zur Nachbildung des Lastdrehmoments M_{Last} kann der zu prüfende Motor mit einem weiteren Elektromotor, z. B. einem permanentmagneterregten Synchronservomotor, gekoppelt werden, der das M_{Last} dynamisch und präzise abbilden kann. Die Drehmomentregelung des Lastmotors ist in der Regel dynamisch genug, sodass auch schnelle Drehmomentänderungen sowohl in der Höhe als auch der zeitlichen Auflösung präzise nachgestellt werden können.

Häufig wird versucht, auch das Massenträgheitsmoment durch diesen Lastmotor nachzubilden, denn der Ausdruck $J \cdot \alpha$ in Gleichung (3) beschreibt ebenso ein Drehmoment. Dieses ist jedoch von der Winkelbeschleunigung α abhängig, für die gilt

$$\alpha = \frac{d\omega_{\text{mech}}}{dt} \quad (4)$$

Zur Berechnung der mechanischen Winkelgeschwindigkeit ω_{mech} aus Gleichung (3) wird Gleichung (4) in dieselbe eingesetzt und nach ω_{mech} aufgelöst.

$$\omega_{\text{mech}} = \frac{1}{J} \int (M_{\text{Motor}} - M_{\text{Last}}) dt \quad (5)$$

Soll also das Massenträgheitsmoment durch einen Lastmotor nachgebildet werden, muss die gemessene mechanische Winkelgeschwindigkeit gemäß Gleichung (3) nach der Zeit differenziert werden, um das resultierende dynamische Drehmoment $J \cdot \alpha$ zu berechnen. Da dieses gemäß Gleichung (5) direkten Einfluss auf die Beschleunigung des Antriebs nimmt, muss das berechnete Drehmoment ohne Zeitverzug von dem Lastmotor geprägt werden, da andernfalls die Zusammenhänge nicht mehr korrekt nachgebildet werden. Dies ist jedoch aufgrund von Latenzen innerhalb der Regelschleife des Lastmotors nicht möglich – die resultierende Nachbildung des Massenträgheitsmoments ist fehlerhaft, was in der Praxis zu Schwingungen führen kann.

Statt der Simulation des dynamischen Drehmoments durch einen Lastmotor wurde im vorliegenden Fall entschieden, das Massenträgheitsmoment der Applikation stattdessen durch rotierende Massen, z. B. in Form von Stahlscheiben, nachzubilden. Bei der Planung und Umsetzung dieses variablen Massenträgheitsprüfstands sollten folgende Punkte Berücksichtigung finden:

1. Die Massenträgheit soll schnell und flexibel, also ohne große mechanische Umbauten, einstellbar sein.
2. Die Baulänge soll möglichst kurz sein.
3. Der mechanische Aufbau soll möglichst spielfrei sein. Im anderen Fall wird hierdurch bei Applikationen mit stark variierenden Drehmomenten und Drehzahlen das Applikationsverhalten falsch wiedergegeben. Zudem können Vibrationen zu starker Geräuschbildung und mechanischen Beschädigungen des Antriebsstrangs führen.

3 Konstruktive Umsetzung

Die im Kapitel 2 erläuterten zentralen Anforderungen an den Prüfstand wurden im Rahmen einiger Besprechungen konkretisiert und mündeten in einer Anforderungsliste (Abbildung 1), die als Grundlage für eine Aufgabenstellung im Rahmen der anzufertigenden Studienarbeiten im Modul „Technische Produktentwicklung“ diene.

Nr.	Hauptmerkmal	Anforderung	Wert	F= Forderung W=Wunsch
1	Geometrie	1.1 Achshöhe der Prüfstandswelle		
		1.1.1 Ideal	≤ 200 mm	W
		1.1.2 Höchstens	≤ 250 mm	F
		1.2 Nutenbett		
		1.2.1 Nutabstand	250 mm	F
		1.2.2 Befestigung des Prüfstandes	M16 Nutensteine und Schrauben	
		1.3 Länge des Prüfstandes (ohne Elektromaschinen)		
		1.3.1 Ideal	≤ 400 mm	W
		1.3.1 Höchstens	≤ 500 mm	F
		1.4 Durchmesser Motorwelle	= 42 mm	F
		1.5 Durchmesser Generatorwelle	= 48 mm	F
		2	Statik, Dynamik	2.1 Zusätzliche Massenträgheit
2.1.1 Feinste Abstufung	= 0,2 kgm ²			F
2.1.2 Maximal	= 2,0 kgm ²			F
2.2 Maximale Drehzahl	= 3000 1/min			F
2.3 Drehmoment				
2.3.1 Maximal	= 500 N m			F
3	Gebrauch	3.1 Geräuschentwicklung	Keine über die Geräusche der Elektromaschinen hinausgehende Geräuschentwicklung	F
		3.2 Lastfall	Schwellend, wechselnd, stoßartig	F
4	Lebensdauer	4.1 Auslegung der Welle	Auf Dauerfestigkeit	F
		4.2 Wälzlager	Mit hoher Sicherheit kein Ausfall während der Gebrauchsdauer des Prüfstandes	F
5	Ergonomie	5.1 Variation des Massenträgheitsmomentes	Ohne Zerlegung des Prüfstandes, insbesondere ohne Demontage der Welle oder der Lagerschilde	F

Abbildung 1: Auszug aus der Anforderungsliste für den Prüfstand

Als konstruktiv besonders herausfordernd ist vor allem die Anforderung anzusehen, eine unkomplizierte Variation des Massenträgheitsmomentes vornehmen zu können. Ausgangspunkt der später ausdetaillierten Lösung war eine Tafelskizze (Abbildung 2), die im Rahmen der ersten Projektbesprechung entstand und bereits das wesentliche Konstruktionsprinzip umreißt.

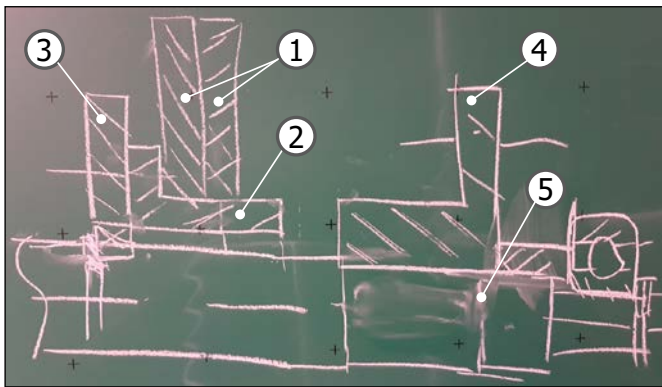


Abbildung 2: Prinzipskizze zur Realisierung eines Aufbaus mit variablem Massenträgheitsmoment

Die Massenträgheitsscheiben (1) können wahlweise am flanschförmigen Ring (2) – im Folgenden „Parkflansch“ genannt – verschraubt werden, der seinerseits mit dem linken Lagerschild (3) der Welle verbunden ist, oder sie werden nach rechts verschoben und an den rechten flanschförmigen Ring (4) – im Folgenden „Arbeitsflansch“ genannt – verschraubt, der drehfest mit der rotierenden Welle (5) verbunden ist. Befinden sich Massenträgheitsscheiben auf dem Arbeitsflansch, so erhöht sich das Massenträgheitsmoment der Welle um die Massenträgheitsmomente der einzelnen Massenträgheitsscheiben. Befinden sich dagegen die Massenträgheitsscheiben, wie oben in der Skizze dargestellt, auf dem ruhenden Parkflansch, so liefern sie keinen Beitrag zur Erhöhung

des Massenträgheitsmomentes der Welle. Die rotierende Welle läuft durch den ruhenden Parkflansch mit ausreichendem Abstand durch und ist in Lagerschilden links (3) und rechts (in Abbildung 2 nicht dargestellt) gelagert.

Abbildung 3 zeigt den finalen Aufbau des Prüfstandes [1] als gerendertes Bild im 3D-CAD-Programm Creo Parametric.

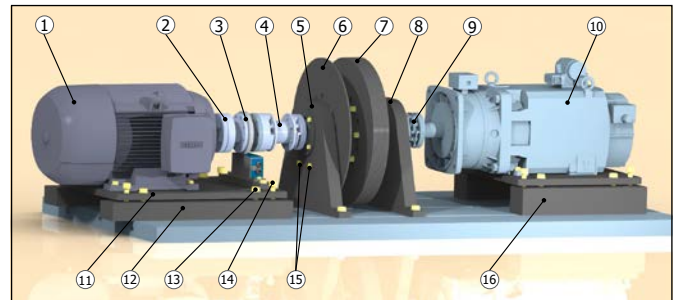


Abbildung 3: Finaler Aufbau des Prüfstandes als CAD-Modell

Links befindet sich der Asynchronmotor (1), der über eine Kupplung (2) mit der Drehmomentmessenrichtung der Fa. Kistler (3) verbunden ist. Die Kupplung (4) wiederum verbindet die Drehmomentmesswelle mit dem Massenträgheitsmomentaufbau, bestehend aus dem Festlagerschild (5), einer „geparkten“ Massenträgheitsscheibe (6), neun weiteren „aktiven“ Massenträgheitsscheiben (7) und dem Loslagerschild (8). Die „geparkte“ Massenträgheitsscheibe (6) wird dabei mit zwei (gelb dargestellten) Schrauben (15) am Festlagerschild (5) fixiert, wodurch zuverlässig ein Losrütteln der Scheibe während des Betriebes verhindert wird. Mit Hilfe einer weiteren Kupplung (9) wird der Wellenstrang mit der Synchronmaschine (10) verbunden, die zur Lastaufprägung dient.

Der Asynchronmotor (1) wird auf eine Grundplatte (11) geschraubt, die ihrerseits auf den Rahmen (12) mit den Sechskantschrauben (13) befestigt wird. Die mit ihrem Schraubenkopf höher liegenden Zylinderkopfschrauben (14) sind jeweils in einem Gewinde in der Grundplatte (11) befestigt. Nach Losdrehen der Sechskantschrauben (13) kann durch Rein- oder Rausdrehen der Zylinderkopfschrauben (14) die Grundplatte (11) relativ zum Rahmen (12) ausgerichtet werden. Nach dem gleichen Prinzip erfolgt die Ausrichtung der Grundplatte der Synchronmaschine relativ zum Rahmen (16). Auf diese Weise wird die Ausrichtung der einzelnen Bestandteile des Wellenstranges wesentlich vereinfacht.

Abbildung 4 zeigt einen Längsschnitt durch den Massenträgheitsmomentaufbau. Die Welle (1) ist im Festlager (2) und im Loslagerschild (10) mit je einem Pendelkugellager (3), (11) gelagert. Die Pendelkugellager haben kegelige Bohrungen, in die so genannte Spannhülsen (12) geschoben werden. Mithilfe von Wellenmutter (13) werden die Spannhülsen fest eingezogen, so dass die Wälzlager über Reibkräfte axial auf dem jeweiligen Wellenabsatz fixiert

werden. Auf diese Weise kann auf ein formschlüssiges, axiales Sicherungselement verzichtet werden. Aus der Sicht der Festigkeit und Lebensdauer der mechanischen Komponenten ist nämlich besonders der vorliegende Lastfall anzusehen, da mit schwellender, wechselnder und stoßartiger Torsionsbeanspruchung der Welle zu rechnen ist.

Um dennoch eine dauerfeste Welle realisieren zu können, ohne die Dimension unnötig groß zu gestalten, musste so weit wie möglich auf Kerbstellen, z. B. durch formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen, Durchmesseränderungen und Nuten zur axialen Fixierung von Komponenten auf der Welle verzichtet werden. So kommt z. B. auch zur drehfesten Verbindung des Arbeitsflansches (8) mit der Welle (1) eine so genannte Schrumpfscheibe (9) zur Anwendung. Durch Anziehen der Schrauben werden dabei zwei konische Elemente ineinandergeschoben, wodurch die Schrumpfscheibe auf den Absatz des Arbeitsflansches einen derartigen Druck ausübt, dass die Übertragung des Torsionsmomentes zwischen Arbeitsflansch und Welle allein durch Reibschluss realisiert wird. Dadurch entfällt an dieser Stelle eine formschlüssige Welle-Nabe-Nabenverbindung, die die dynamische Tragfähigkeit der Welle deutlich reduziert hätte. Nach ähnlichen Prinzipien wurden auch alle übrigen Welle-Nabe-Verbindungen des Prüfstandes gestaltet. Mithilfe des in der DIN 743 festgelegten Rechenganges wurde in [1] die Dauerfestigkeit der Welle mit einer hohen Sicherheit nachgewiesen.

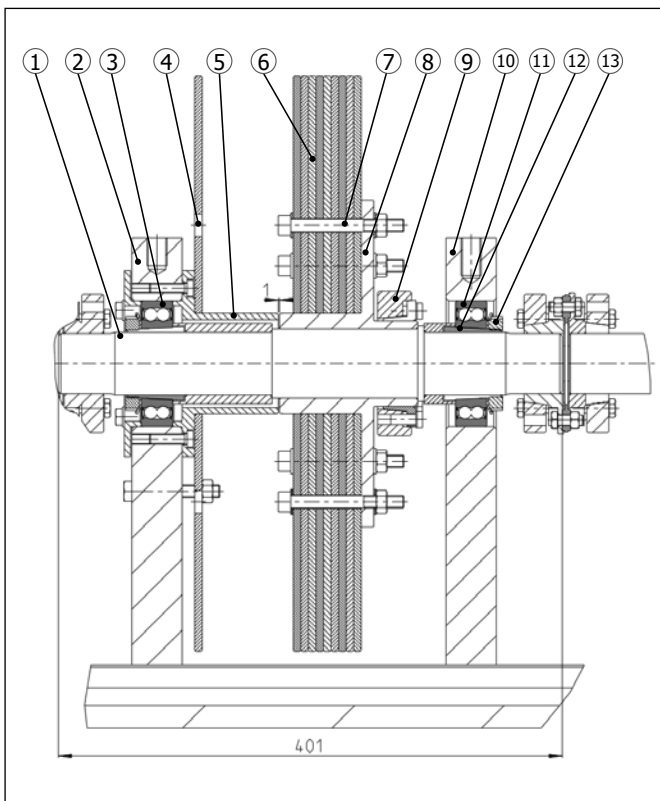


Abbildung 4: Längsschnitt durch den Massenträgheitsmomentaufbau

Um die Kompaktheit des Aufbaus weiter zu steigern, wurden neben den acht Durchgangsbohrungen für die Schäfte der Befestigungsschrauben (7) noch acht weitere, um $22,5^\circ$ versetzte Bohrungen mit größeren Durchmessern in die Massenträgheitsscheiben eingebracht. Auf diese Weise konnten die geparkten und die aktiven Massenträgheitsscheiben näher zusammengeschoben werden, da die Befestigungsschrauben (7) für die aktiven Massenträgheitsscheiben (6) durch die großen Bohrungen der „geparkten“ Massenträgheitsscheiben (4) durchgesteckt werden können, weil ein seitliches „Einfädeln“ der Schrauben nun nicht mehr möglich gewesen wäre. Dieses Zusammenschieben hatte zur Folge, dass bezüglich der Länge der Einheit sogar die Wunschforderung von $l = 400 \text{ mm}$ mit 401 mm annähernd erfüllt werden konnte.

Gegenüber der Entwurfsskizze in Abbildung 2 sind der Park- (5) und der Arbeitsflansch (8) deutlich näher, nämlich mit einem Abstand von nur noch 1 mm , zusammengückt. Auf diese Weise wird das Verschieben der jeweils etwa $7,3 \text{ kg}$ schweren Massenträgheitsscheiben vom Park- auf den Arbeitsflansch (oder umgekehrt) wesentlich vereinfacht, weil sie nun beim Verschieben nicht mehr über den Spalt gehoben werden müssen.

Zur Vereinfachung des Handlings während des Aufbaus des Prüfstandes wurden zudem Gewinde oben in die Lagerschilde gebohrt, in die Ringschrauben für den Transport mit einem verfahrbaren Kran eingedreht werden können.

4 Umsetzung und Inbetriebnahme

Der Prüfstand wurde im Labor für Elektrische Maschinen und Antriebe der Fakultät EMI aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Resultierender Aufbau des Prüfstandes im Labor

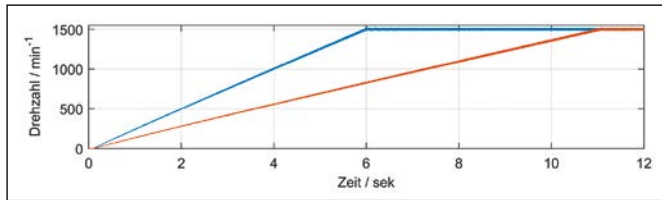


Abbildung 6: Hochläufe bei gleicher Drehzahl und unterschiedlicher Massenträgheit; blau $J_1 = 1,34 \text{ kgm}^2$; rot $J_2 = 2,34 \text{ kgm}^2$

Abbildung 6 zeigt jeweils einen Beschleunigungsvorgang des Antriebs aus dem Stillstand bis zu einer mechanischen Drehzahl von $n_{\text{mech}} = 1500 \text{ min}^{-1}$. In beiden Fällen wurde der Antrieb mit einem konstanten Drehmoment M_{Motor} beschleunigt, jedoch wurden die Massenträgheitsmomente mit $J_1 = 1,34 \text{ kgm}^2$ und $J_2 = 2,34 \text{ kgm}^2$ unterschiedlich gewählt.

Da im vorliegenden Fall das Lastmoment M_{Last} während des Beschleunigungsvorgangs lediglich aus dem Reibmoment bestand, dieses jedoch vernachlässigbar ist, vereinfacht sich Gleichung (5) zu:

$$\omega_{\text{mech}} = \frac{1}{J} \int M_{\text{Motor}} dt \quad (6)$$

Nach einfachen mathematischen Umformungen erhält man für die Beschleunigungszeit des Antriebsstrangs für eine Drehzahländerung um Δn_{mech}

$$\Delta t_{\text{Beschl}} = \frac{2\pi \cdot \Delta n_{\text{mech}}}{60 \text{ s} \cdot M_{\text{Motor}}} \cdot J \quad (7)$$

Betrachtet man in Abbildung 6 die Änderung der Drehzahl von $n_{\text{mech}} = 1000 \text{ min}^{-1}$ auf $n_{\text{mech}} = 1500 \text{ min}^{-1}$ fällt auf, dass der Antrieb mit J_1 (blau) ca. 2 Sekunden, mit J_2 (rot) ca. 3,5 Sekunden benötigt. Da in beiden Fällen dasselbe Drehmoment M_{Motor} den Antrieb beschleunigt, muss gemäß Gleichung (7) gelten:

$$\frac{\Delta t_{\text{Beschl}}(J_1)}{\Delta t_{\text{Beschl}}(J_2)} = \frac{J_1}{J_2} \quad (8)$$

Setzt man die gegebenen Werte ein, folgt:

$$\frac{\Delta t_{\text{Beschl}}(J_1)}{\Delta t_{\text{Beschl}}(J_2)} = 0,57 \quad (9)$$

$$\frac{J_1}{J_2} = 0,57 \quad (10)$$

Die theoretisch ermittelten Werte für die Beschleunigungszeiten stimmen also sehr gut mit den am Prüfstand gemessenen überein.

5 Zusammenfassung

Ein Prüfstand zur Simulation unterschiedlicher mechanischer Last wurde fakultätsübergreifend geplant und umgesetzt. Die Simulation des Lastmoments wird über einen Lastmotor abgebildet, wohingegen das Massenträgheitsmoment über einen variabel einstellbaren Massenträgheitsprüfstand umgesetzt wird. Da dieser auf tatsächlich rotierenden Massen beruht, sind Schwingungen, wie sie bei der Simulation des von der Winkelbeschleunigung abhängigen dynamischen Drehmoments über einen Servomotor vorkommen können, ausgeschlossen. Durch die Konstruktion der Mechanik können die aktiven Massen spielfrei, einfach, schnell und flexibel eingestellt werden. Ebenso nimmt durch die kurze Baulänge des Prüfstands die resultierende Länge des gesamten Antriebsstrangs nicht allzu stark zu. Die Praxistauglichkeit des Aufbaus wurde bereits in zahlreichen Messungen für wissenschaftliche Veröffentlichungen unter Beweis gestellt.

Referenzen:

- [1] Lück, M.: Konstruktion eines Elektromotorenprüfstandes mit variablen Massenträgheitsmoment. Unveröffentlichte Studienarbeit im Modul „Technische Produktentwicklung“ im Studiengang Maschinenbau an der OTH Amberg-Weiden, 2019

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Horst Rönnebeck

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

h.roennebeck@oth-aw.de



Hauke Nannen, M.Sc.

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

h.nannen@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Heiko Zatocil

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

h.zatocil@oth-aw.de

Numerische Modellierung des Wärme- und Stofftransports in AlN-Pulvern einschließlich chemischer Reaktionen

Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke
Shiva Krishna Tangedipelli, M.Sc.
Dipl.-Phys. Andreas Lesnik
Dr. Boris Epelbaum
Dr.-Ing. Stephan Müller

Zusammenfassung

Aluminiumnitrid (AlN) ist das Basismaterial für ultraviolett emittierende Leuchtdioden (UV-LEDs). Aufgrund der extremen Prozessbedingungen bei der AlN-Materialherstellung mit dem PVT-Verfahren (Physical Vapor Transport) und der Tatsache, dass die Bedingungen innerhalb des Züchtungstiegels nicht direkt experimentell zugänglich sind, spielt die numerische Simulation eine Schlüsselrolle bei der Prozessanalyse und -optimierung. Mithilfe der simulationsgetriebenen Prozessentwicklung werden im Vorhaben „Sim_AlN_100“ neuartige Anlagen und Prozesse zur systematischen Durchmessererweiterung der gezüchteten Kristalle konzipiert. Dies beinhaltet neben umfassenden Simulationsrechnungen auch die Weiterentwicklung physikalischer Modelle.

Abstract

Aluminumnitride (AlN) is the basis material for ultra-violet light emitting diodes (UV-LEDs). Due to the extreme process conditions in AlN material production utilizing the PVT-method (Physical Vapor Transport) and the fact, that the conditions inside the growth crucible are not directly experimentally accessible, numerical simulation plays a key role in process analysis and -optimization. With the help of simulation-driven process development, new types of systems and processes for the systematic expansion of the diameter of the grown crystals are being designed in the “Sim_AlN_100” project. In addition to comprehensive simulation calculations, this also includes the further development of physical models.

1 Einleitung

Simulationsgetriebene Produkt- und Prozessentwicklung (Simulation Driven Product and Process Development) ist eine wesentliche Technologie zur Beschleunigung und Optimierung neuartiger Produkte und Prozesse. Die numerische Simulation ermöglicht erste Variantenstudien bereits in der Konzeptphase und ermöglicht damit umfassende Analysen lange vor der Verfügbarkeit erster Prototypen. Im Rahmen der Prozessentwicklung können optimale Prozessparameter identifiziert werden, ohne die notwendige Durchführung der oftmals sehr teuren und zeitaufwendigen Laborversuche. Simulationsmodelle sind damit ein wesentlicher Bestandteil des Digitalen Zwillings eines Produktes oder Prozesses. [1]

Im Bereich der Materialherstellung sind einige Verfahren durch extreme Prozessbedingungen charakterisiert, die eine messtechnische Erfassung nahezu unmöglich

machen. So findet z. B. die Kristallzüchtung von Aluminiumnitrid (AlN) Einkristallen (Abbildung 1) mit dem PVT-Verfahren (PVT: „Physical Vapor Transport“) bei extrem hohen Züchtungstemperaturen bis zu 2500°C und in einer chemisch aggressiven Al-Atmosphäre statt. Diese Rahmenbedingungen schließen es mehr oder weniger aus, umfangreiche Messdaten über die Kristallwachstumsbedingungen, insbesondere über die kritischen Bedingungen innerhalb des geschlossenen Züchtungstiegels zu gewinnen, was die Prozessentwicklung hemmt. [2, 3]

Aufgrund des quasi fehlerfreien atomaren Aufbaus besitzen Einkristalle Eigenschaften, die sie erheblich von den anderen Materialklassen unterscheiden. Einsatzbereiche sind die Energietechnik, die Kommunikation, Beleuchtungssysteme, Laser und Sensoren [4]. Der Halbleiter AlN und darauf aufgebaute AlGaN-Verbindungen emittieren Strahlung im Wellenlängenbereich von 200 – 280nm (fernes UVC) und sind beispielsweise für neuartige Systeme

zur Desinfektion und Entkeimung von Wasser, Luft und Oberflächen besonders relevant. [5, 6]

Eine Herausforderung bei der Kristallzüchtung der AlN-Volumenkristalle als Basis dieser Schlüsseltechnologie ist gegenwärtig die *kommerzielle* Verfügbarkeit von AlN-Substraten mit hinreichender Kristallqualität und geeigneten Durchmessern für die weitere Prozessierung.



Abbildung 1: Mit dem PVT-Verfahren am Fraunhofer-Institut IISB gezüchteter Aluminiumnitrid-Kristall [7].

2 Systematische Modellentwicklung

Die Gegebenheiten beim PVT-Verfahren verdeutlichen klar die Vorteile einer simulationsgetriebenen Entwicklung. Die numerische Simulation liefert grundsätzlich immer eine vollständige Information zu den physikalischen Verhältnissen (z. B. Temperatur- und Speziesverteilung), und Konzeptvarianten können im Vergleich zum Experiment in deutlich kürzerer Zeit bewertet werden. Voraussetzung

sind allerdings geeignete und *experimentell bestätigte* Modellansätze. Dies beinhaltet neben der Modellierung der physikalischen Prozesse (z. B. Stofftransport und Phasenübergang) geeignete Stoffwerte (insbesondere bei hohen Temperaturen) und Randbedingungen (z. B. Wärmeabfuhr und effektive Heizleistungen).

Zur Anwendung kommen im Vorhaben das kommerzielle Software Tool ANSYS [8] als auch das speziell für die Kristallzüchtung entwickelte Programm CrysMAS [7]. Die komplexen Multiphysics-Berechnungen beinhalten die Disziplinen der Wärme- und Stoffübertragung sowie strukturmechanische Analysen. Neben der umfassenden physikalischen Modellierung sind bei den Simulationen Sensitivitätsanalysen zu den verschiedenen Parametern wesentlich, da insbesondere die Materialeigenschaften bei den extrem hohen Prozesstemperaturen mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Parametrisierte Berechnungsmodelle (auch CAD-Geometrien) erlauben die Anwendung moderner Optimierungsalgorithmen.

Abbildung 2 zeigt die Meilensteine zur Definition der optimalen Anlagengeometrie und Prozessparameter für AlN-Kristalle mit vergrößertem Durchmesser. In Phase 1 wird zunächst ein komplexes Simulationsmodell mit der Berücksichtigung verschiedener physikalischer Phänomene für aktuelle 1-Zoll-Kristalle entwickelt. Mit diesem Modell wird in Phase 2 der Kristallzüchtungsprozess für den Übergang zu 2-Zoll-Kristallen in den bestehenden Anlagen optimiert. Die Modellvorhersagen werden in beiden Projektabschnitten durch Versuche am Fraunhofer IISB experimentell verifiziert. Das Modell dient in Phase 3 zur Gestaltung eines Prozesses für weiter vergrößerte Kristalldurchmesser.

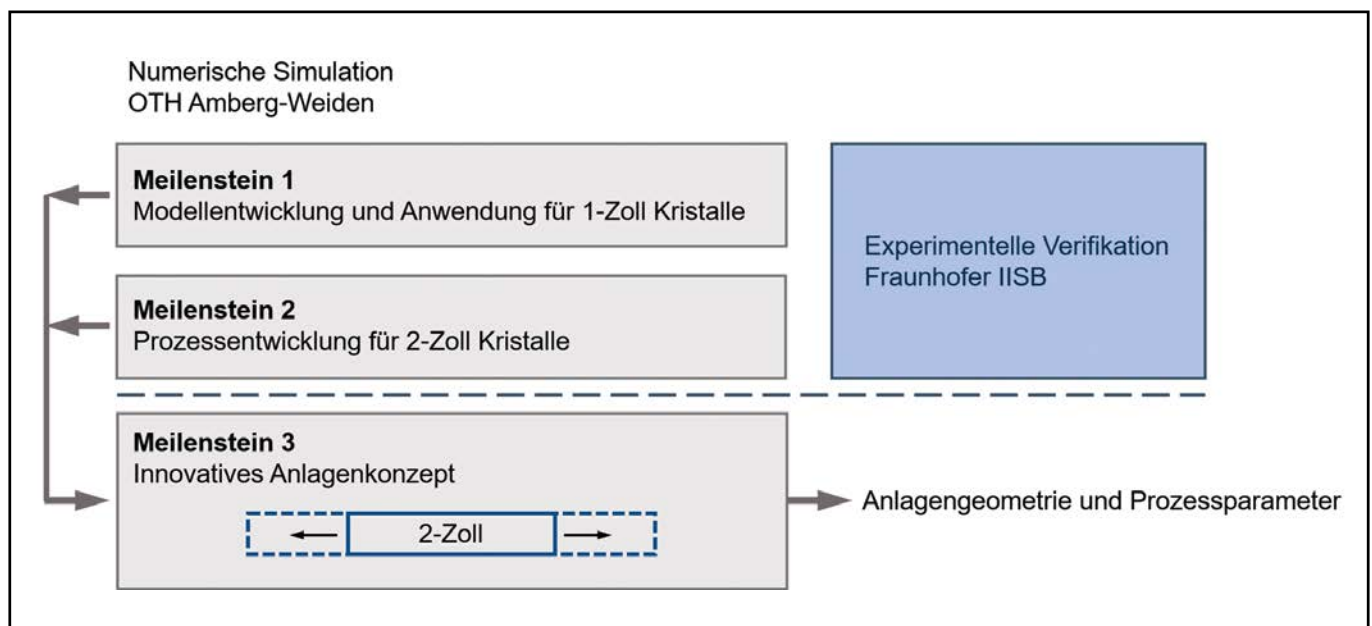


Abbildung 2: Meilensteine zur Definition der optimalen Anlagengeometrie und Prozessparameter für AlN-Kristalle mit vergrößertem Durchmesser

3 Transportvorgänge im Quellmaterial

Die Wachstumsrate v_G ist primär abhängig von den thermischen Bedingungen in der PVT-Anlage, sodass die möglichst genaue Vorhersage einer Temperaturverteilung die Basis für weitere Modellentwicklungen bildet. Erste einfache Transportmodelle ermöglichen die Abschätzung der zu erwartenden Wachstumsrate basierend auf den Temperaturen an der Pulveroberfläche und dem Keim mit einer angenommenen Sublimation der chemischen Spezies, beschränkt auf die Pulveroberfläche (Abbildung 3, Modell (A)). Eine nicht ausreichend genaue Vorhersage der Temperaturverteilung ist hierbei direkt ursächlich verknüpft mit potentiellen Abweichungen einer vorhergesagten Wachstumsrate von experimentellen Daten. Systematische Parameteroptimierungen während der Simulation (insbesondere die Materialparameter bei den extrem hohen Temperaturen) sind eine effektive Strategie zur Minimierung derartiger Abweichungen. [2, 3]

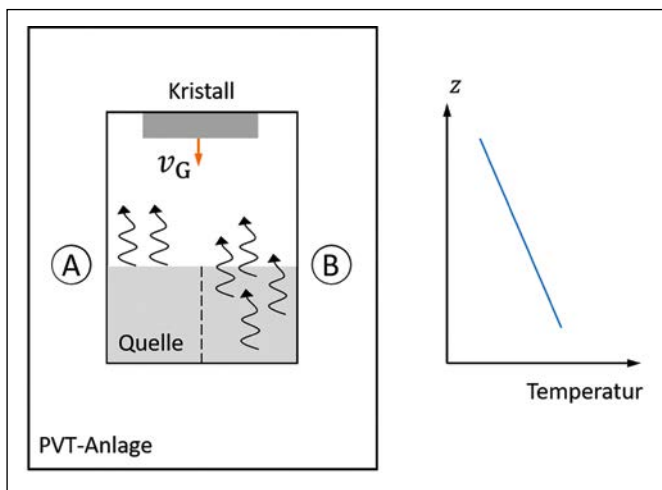


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer PVT-Anlage und typisches axiales Temperaturprofil. Bei Modell (A) werden die chemischen Spezies an der Oberfläche der Quelle freigesetzt, Modellvariante (B) berücksichtigt die Pulverstruktur der Quelle. Das Modell wird dadurch erheblich umfangreicher.

Zusätzlich muss aber auch das zugrunde liegende physikalische Modell erweitert werden, wie im Folgenden für die Transportvorgänge im Quellmaterial kurz dargestellt werden soll. Aufgrund der porösen Struktur des Pulvers können chemische Spezies nicht nur von der Pulveroberfläche, sondern auch aus dem Volumen in Richtung des Kristalls transportiert werden und so zu einer Vergrößerung des Speziesflusses zum Kristall führen (Abbildung 3, Modell (B)). Verstärkt wird der Effekt durch den größeren Partialdruck der Spezies am heißeren Boden der Quelle durch das in diese Richtung ansteigende Temperaturprofil. Die mathematische Modellierung umfasst die Transportvorgänge im Pulver (Energie und Spezies) als auch chemische Reaktionen zur Erzeugung und Verbrauch der Spezies. Aufgrund der Pulverstruktur wird beispielsweise die Diffusion der chemischen Spezies behindert, was durch effektive Diffusionskoeffizienten abgebildet werden

kann. Bei der Wärmeübertragung müssen Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung berücksichtigt werden. Die Wärmeübertragung zwischen dem Körner wird weiterhin durch die Struktur der Körner beeinflusst. [9, 10]

Üblicherweise werden Pulver in Modellen als poröse Medien mit einer Porosität abgebildet, die auf (lokal und zeitlich variierenden) gemittelten Eigenschaften basieren. Das Pulver ist charakterisiert durch eine mittlere Größe der Partikel, die häufig als kugelförmig angenommen werden. Diese Strategie ist numerisch sehr effizient, bedeutet aber auch einen hohen Modellierungsaufwand. Lokale Informationen, z. B. zur Speziesverteilungen, können mit diesem Modellansatz nicht vorhergesagt werden. Alternativ ist es aufgrund der vergleichsweise groben Pulverstruktur durchaus denkbar, das Pulver im CAD-Modell des Systems als idealisiertes Modellpulver abzubilden. Dies erlaubt einen „genaueren Blick“ auf die auftretenden Prozesse und einen reduzierten Modellierungsaufwand. Die Berechnungen können weiterhin als Benchmark-Ergebnisse zur Anpassung der analytischen Modelle für das poröse Medium verwendet werden. Allerdings ist auch dieser Ansatz limitiert und erfordert z. B. bei Berücksichtigung von Sintereffekten einen sehr hohen numerischen Aufwand. In Abbildung 4 ist exemplarisch die Al-Speziesverteilung für die beiden Modellansätze gezeigt.

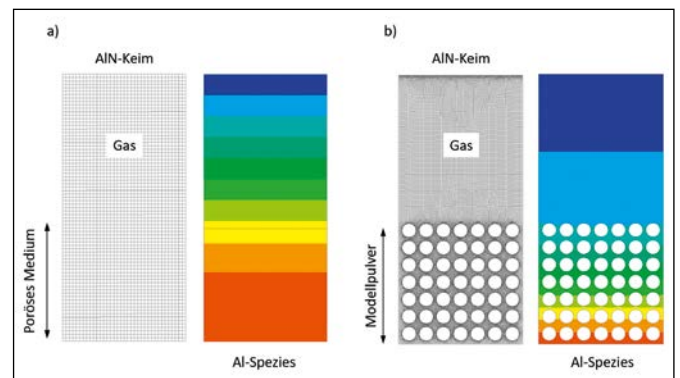


Abbildung 4: Berechnete Verteilung der Al-Spezies a) mit dem klassischen Ansatz eines porösen Mediums für das Pulver und b) mit geometrisch abgebildeten idealisierten Körnern für Benchmark-Rechnungen und detaillierte Betrachtungen. Die Simulationen sind mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt worden und können nicht direkt verglichen werden.

4 Fazit

Grundlage für die Vorhersage des Wachstums der AlN-Kristalle ist eine möglichst genaue Berechnung der Temperaturverhältnisse in der PVT-Anlage. Weitere physikalische Effekte können in die Modelle integriert werden, müssen aber konsequent hinsichtlich ihrer Bedeutung bewertet werden. Dabei gilt der Grundsatz, dass die Modelle nicht als „richtig“ oder „falsch“, sondern besser als „geeignet“ und „nicht geeignet“ klassifiziert werden sollten. Die enge Verknüpfung zwischen Modellentwicklung und experimentellen Untersuchungen ist wesentlich für die angestrebte Prozessdefinition und -optimierung.

Referenzen:

- [1] Eigner, M.; et al: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Springer Vieweg, 2014
- [2] Hartmann, C.: Bulk AlN growth by physical vapour transport, Semi. Sci. Tech., Vol. 29, No. 8, 2014
- [3] Epelbaum, B.M.; et al.: Similarities and differences in sublimation growth of SiC and AlN, J. Cryst. Growth, 305, 317-325, 2007
- [4] 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
- [5] Li, J.; Zhang, G.Q.: Light-Emitting Diodes – Materials, Processes, Devices and Applications, Springer, 2019
- [6] Advanced UV for Life: www.advanced-uv.de
- [7] Fraunhofer IISB: www.iisb.fraunhofer.de
- [8] ANSYS: www.ansys.com
- [9] Selder, M.: Mathematische Modellierung und numerische Simulation der Sublimationszüchtung von Siliciumkarbid-Volumenkristallen, Phd., FAU Erlangen-Nürnberg, 2002
- [10] Kaviany, M.: Principles of heat transfer in porous media, Springer, 1999

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



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



Dipl.-Phys. Andreas Lesnik

Fraunhofer-Institut
für Integrierte Systeme und
Baelementetechnologie IISB
Schottkystraße 10
91058 Erlangen

andreas.lesnik@iisb.fraunhofer.de



Dr. Boris Epelbaum

Fraunhofer-Institut
für Integrierte Systeme und
Baelementetechnologie IISB
Schottkystraße 10
91058 Erlangen

boris.epelbaum@iisb.fraunhofer.de



Dr.-Ing. Stephan Müller

Fraunhofer-Institut
für Integrierte Systeme und
Baelementetechnologie IISB
Schottkystraße 10
91058 Erlangen

stephan.mueller@iisb.fraunhofer.de

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



KI-basierte Optimierung von Daten-Pipelines

Zusammenfassung

Künstliche Intelligenz (KI) entwickelt sich kontinuierlich weiter und nimmt eine zunehmend allgegenwärtige Rolle in unserem täglichen Leben ein. Neue Modelle sind in der Lage immer komplexere Aufgaben zu bewältigen. Zugleich ermöglichen es neue Strategien und optimierte Hardware immer anspruchsvollere Machine Learning (ML) Algorithmen auf mobilen Endgeräten auszuführen. Daraus entsteht das Potenzial, anfallende Daten effizient an ihrem Entstehungsort zu verarbeiten. Dieses sogenannte Edge Computing und die damit zusammenhängenden Herausforderungen sind ein Hauptaugenmerk der Untersuchungen des europäischen Forschungsprojektes „Artificial Intelligence for Digitalizing Industry“ (AI4DI), in welchem Partner aus den verschiedensten Industriezweigen auf dem Gebiet KI miteinander kollaborieren.

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

Die Automotive-Forschungsgruppe der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW) erforscht in diesem Projekt über einen Zeitraum von insgesamt drei Jahren die Optimierungsmöglichkeiten von KI-basierten Datenverarbeitungsprozessen in Edge-Netzwerken, welche als Teil des Anwendungsbereiches von intelligenten Transportsystemen (ITS) einhergehen. Im zweiten Projektjahr befasste sich die OTH AW mit der Realisierung und Optimierung von Daten-Pipelines in einer zuvor realisierten Testumgebung.

Abstract

Artificial intelligence (AI) is continuously evolving and assuming an increasingly ubiquitous role in our daily lives. New models are capable of handling increasingly complex tasks. At the same time, new strategies and optimized hardware enable more sophisticated machine learning (ML) algorithms to be executed on mobile devices. This creates the potential to process data efficiently at the point of origin. This so-called edge computing and the associated challenges are a major focus of the investigations of the European funded project "Artificial Intelligence for Digitizing Industry" (AI4DI), in which partners from a wide range of industries are working together on pushing the limits of AI.

The project is funded by the European Union within the framework of the H2020 ECSEL Joint Undertaking as well as the involved national funding agencies, including the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in Germany.

The automotive research group of University of Applied Sciences Amberg-Weiden (OTH AW) investigates in this project over a period of three years the optimization possibilities of AI-based data processing in edge networks, which are part of the application area of intelligent transportation systems (ITS). In the second project year, the OTH AW dealt with the realization and optimization of data pipelines in a previously realized test environment.

1 Einleitung

Im Mai 2021 betitelte Verkehrsminister Andreas Scheuer Daten als den „Treibstoff der Zukunft“ [1]. Zudem verwies er auch auf das Optimierungspotenzial durch lokal erhobene Verkehrsdaten. Um dieses jedoch effektiv nutzen zu können, ist ein Wandel der bestehenden Infrastruktur unabdinglich. Bestehende Infrastrukturelemente (Ampeln, Verkehrskameras, etc.) müssen mit Recheneinheiten ausgestattet werden, um die anfallenden Datenströme direkt vor Ort in eine verwertbare Form zu transformieren. Um einen solchen Smart City Ansatz effektiv zu realisieren, arbeitet das Konsortium des Forschungsprojektes Artificial Intelligence for Digitalizing Industry (AI4DI) unter anderem an der Entwicklung und dem Einsatz von neuen Edge Computing Plattformen, auf welchen die KI-Algorithmen gerechnet werden sollen. Das Projekt fällt unter dem Schirm Electronic Components and Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU) und umfasst ein Gesamtbudget von etwa 30 Millionen Euro für den Zeitraum von drei Jahren (2019-2022) [2].

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

Im Folgenden werden die Ergebnisse des zweiten Projektjahres (Juli 2020 bis Juli 2021) zusammengefasst. Auf Basis einer zuvor entwickelten Testumgebung für Intelligente Transportsysteme (ITS) [4] werden verschiedene State of the Art Algorithmen evaluiert und Konzepte für intelligente Daten-Pipelines erprobt.

2 Datenverarbeitung an der Quelle

Im Rahmen des technologischen Fortschritts nimmt die Anzahl der Datenquellen stetig zu. Große Serverfarmen widmen sich dem Zweck die erhobenen Rohdaten zu akkumulieren und in eine für Menschen verwertbare Form zu bringen. Dieses Vorgehen ist nicht nur ressourcenintensiv, es bringt auch zusätzliche Latenzzeiten durch den Datentransfer mit ein. Echtzeitaufgaben, wie z. B. das autonome Fahren werden dadurch schwierig bis gar

nicht realisierbar. Ein Paradigmenwechsel in der Datenverarbeitung ist ein erfolgversprechender Lösungsansatz für die genannten Herausforderungen. Edge-Computing bezeichnet das Verlagern der Rechenaufgaben weg von Cloud-Servern hin zu anwendungsnahen Rechenknoten. Konkret sollen Infrastrukturelemente (z. B. Verkehrskameras) mit eigenen Recheneinheiten ausgestattet werden, welche direkt vor Ort die Auswertung der erhobenen Daten vornehmen können. Ein solches Vorgehen wäre erheblich ressourcenschonender als bestehende Lösungen, reduziert kritische Verzögerungen und bietet durch Datenlokalität zudem einen besseren Datenschutz.

Im Folgenden soll anhand von Verkehrskameras im Tampere City (Finnland) [5] erläutert werden, wie ein solcher Ansatz genutzt werden kann, um Verkehrsaufkommen vorherzusagen und zu optimieren. Die verwendeten Kamerabilder wurden über einen Zeitraum von mehreren Monaten von 2019 bis 2020 gesammelt. Zur Analyse der Bilddaten wurde ein You Only Look Once (YOLO) [6] Object Detection Modell verwendet. Dieses liefert zu jedem Frame eine Objektliste mit der Position, Klasse und Konfidenzniveau der gefundenen Objekte. Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer solchen Frameanalyse grafisch aufbereitet. Für jedes Objekt wurde eine sogenannte Bounding Box eingezeichnet und entsprechend mit Kategorie und Wahrscheinlichkeiten beschriftet.

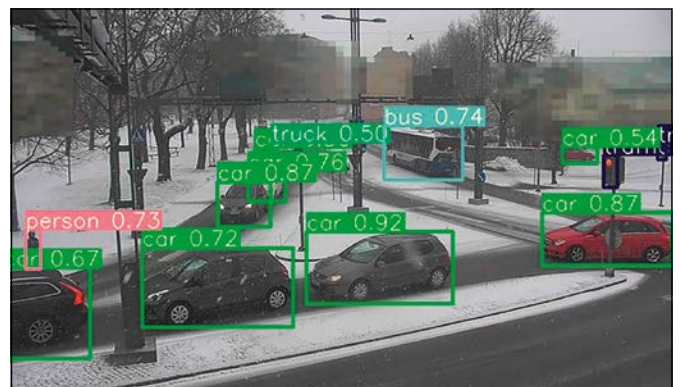


Abbildung 1: Objekterkennung einer Verkehrskamera in Tampere

Mit den Objektlisten und der Kamera Framerate ist es möglich, das Verkehrsaufkommen für einen Zeitraum zu evaluieren. Somit können Peak-Zeiten bestimmt und Langzeittrends erkannt werden. Eine solche Analyse wurde mit der zuvor vorgestellten Verkehrskamera für den Zeitraum von November 2019 bis Mai 2020 durchgeführt. In Abbildung 2 ist ein plausibler Trend zu erkennen; in den Nachtstunden liegt ein eher geringes Verkehrsaufkommen vor, während zur Mittagszeit ein klarer Peak sichtbar ist. Ein Berufsverkehrsmuster ist hingegen nicht zu erkennen. Dies lässt sich auf die zentrale Position der Kreuzung zurückführen. Ein anderes Phänomen ist ein starker Rückgang an Fahrzeugen zwischen Februar und März. Dies ist mutmaßlich auf die ersten Covid-19-Gegenmaßnahmen zurückzuführen, welche wiederum zur Folge hatten, dass Menschen insgesamt ihr Auto weniger häufig nutzten.

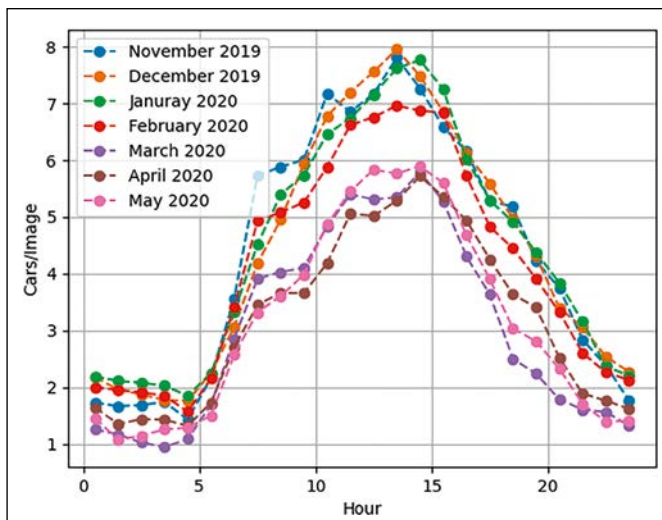


Abbildung 2: Gleitender Mittelwert der Verkehrsdichte als Tagesverlauf für mehrere Monate

Die Anzahl der Fahrzeuge allein ist kein guter Indikator für die Qualität der Vorhersage des Verkehrsflusses. Hier muss das dynamische Verhalten in Bezug auf Zeit und Raum berücksichtigt werden. Dies ist möglich, indem die Position der erkannten Objekte in jedem Bild genommen und ein gemittelter Durchschnitt über ein vordefiniertes Zeitintervall gebildet wird. In Abbildung 3 wurde dies in Form einer Heatmap durchgeführt. Die tiefroten Bereiche zeigen stagnierenden Verkehr oder parkende Autos an, während dunkelblau die Abwesenheit von Fahrzeugen impliziert. Die Analyse dieser Heatmap deutet darauf hin, dass die Ampeln Standzeiten verursachen, welche durch eine Optimierung der Schaltzeiten oder die Berücksichtigung von Kreisverkehren reduziert werden könnten.

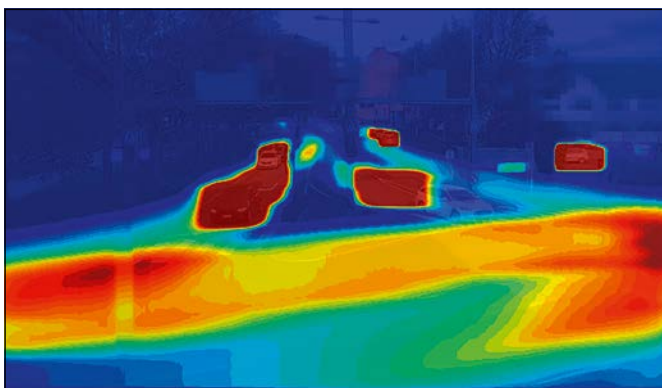


Abbildung 3: Trafficflow Heatmap

Diese praktischen Beispiele demonstrieren das Anwendungspotential, um bestehende Infrastrukturen auf intelligente Weise zu analysieren und zu optimieren. Die vorgeschlagenen Modelle und Algorithmen sind schnell genug, um in Echtzeit auf eingebetteter Hardware zu laufen. So können Kameras kosteneffizient mit Recheneinheiten ausgerüstet werden, welche autark die Situation lokal auswerten und nur das Ergebnis an einen zentralen Server oder andere Teile der Infrastruktur weitergeben.

3 Objektdetektion

Die Entwicklung eines Objekterkennungsmodells kann als eine anspruchsvolle Aufgabe angesehen werden, da Bildelemente sowohl gefunden als auch identifiziert werden müssen. Ein naiver Ansatz wäre die Verwendung eines etablierten Convolutional Neural Networks (CNN) zur Bildklassifizierung, wie z. B. ResNet [7] mit einem Sliding-Window-Ansatz zur Erkennung möglicher Objekte innerhalb des Frames. Zusätzlich können Schwellwerte und Non-Maximum-Suppression (NMS) [8] verwendet werden, um die optimale Bounding Box für jedes Objekt zu finden. Dies würde in der Theorie funktionieren, jedoch würde dies mit hohem Rechenaufwand und langen Inferenzzeiten einhergehen.

Stattdessen wird bei den meisten modernen Echtzeitmodellen zur Objekterkennung auf Single Shot Detectors (SSD) [9] gesetzt. Sie verwenden ein Backbone Netzwerk, welches aus einem Bild eine Featuremap generiert. Dieser Tensor wird zur Weiterverarbeitung in ein Raster zerlegt. Das Modell verfügt über eine vordefinierte Anzahl von Ankerboxen, die auf jedes Segment angewendet werden. Der Rest des Netzes ist dann dafür zuständig, eine Klasse, Konfidenzwert und Offset-Parameter für die Ankerboxen zu errechnen. Schließlich wird mit dem Schwellwert und NMS das Endergebnis ermittelt. YOLO-Modelle sind eine spezielle Klasse von SSD's. Als Backbone wird die eigene Darknet-CNN-Architektur [10] verwendet und die Klassifizierung setzt sowohl auf Convolutional als auch Dense Layer.

Die zuvor beschriebenen Modelle können über sogenannte Model Zoos bezogen werden. Transfer Learning ermöglicht, die Netzwerke für einen bestimmten Anwendungszweck anzutrainieren. Durch dieses Vorgehen kann das Modell neue Kategorien erlernen und ggf. bessere Performance erzielen, ohne von Grund auf neu trainiert werden zu müssen. Das Deployment erfolgt entweder über Tensorflow Lite (TFLite) oder die Open Neural Network Exchange (ONNX) Runtime. Welches Framework verwendet wird, ist abhängig von der verwendeten Hardware. Berechnungen auf Googles Tensor Processing Unit (TPU) erfordern TFLite. ONNX kann sowohl von Visual-, Graphic- und Central-Processing-Units Gebrauch machen. Abbildung 4 veranschaulicht diesen Workflow von der Modell-Beschaffung bis hin zum Deployment.

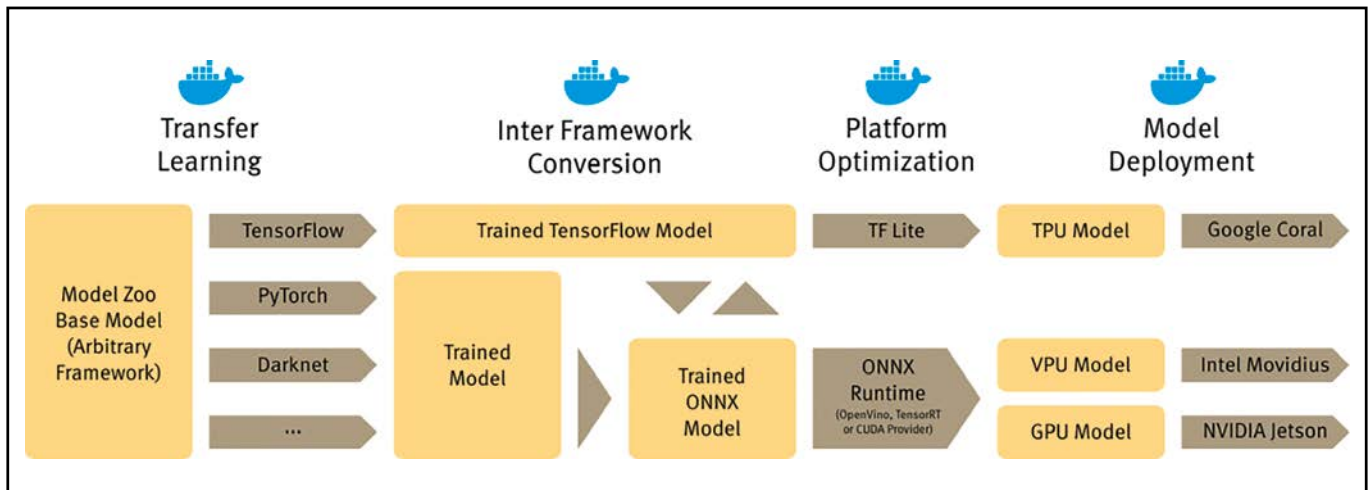


Abbildung 4: Modell Deployment Pipeline

4 Benchmark

Im Rahmen eines großangelegten Benchmarks wurden verschiedene State of the Art Object Detection Modelle auf den Plattformen des Tischaufbaus [3] getestet. Dieser Bericht bildet, der Übersicht halber, eine repräsentative Auswahl der Resultate ab. Als Basisplattform dient ein NVIDIA Jetson Xavier mit ARM CPU und integrierter Volta GPU. Eine TPU und VPU sind zusätzlich über USB angebunden. Die Energiezufuhr des Device Under Test (DUT) erfolgt über einen eigens entwickelten Energiemonitor (EM). Dieser misst mit einer Abtastfrequenz von 50Hz die Versorgungsspannung sowie den Betriebsstrom. Die erhobenen Daten werden kontinuierlich über die serielle Schnittstelle des EM ausgegeben. Ein Raspberry Pi3 Einplatinencomputer übernimmt die Rolle als Messserver. Sobald auf dem DUT eine Messung getriggert wird, erhält der Pi einen Befehl, die Daten des EM auszulesen und zu puffern. Bei Abschluss der Messung werden aufgenommene Energiedaten an das DUT gesendet, um diese dem Messprotokoll anzufügen. Die Auslagerung des Messservers auf einen Raspberry Pi ist erfolgt, um die Messung möglichst wenig durch andere Softwareprozesse zu verfälschen. Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Messaufbau. Der Jetson Xavier stellt hier das DUT dar, welches auch durch eine beliebige andere Embedded Plattform ersetzt werden kann (z. B. Jetson Nano, Coral Board, etc.).

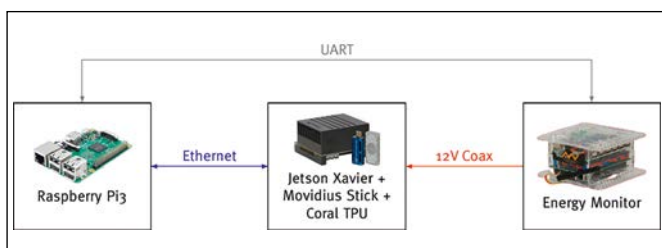


Abbildung 5: Benchmark Messaufbau

Die Grafiken in Abbildung 6 und 7 zeigen die Messergebnisse eines TinyYOLOv4 [11] Netzwerks. Dieses hat sich im Rahmen des Benchmarks als bester Kompromiss

zwischen Geschwindigkeit und Präzision herausgestellt. Es wurden Zeit und Energiebedarf als Metriken betrachtet, um das System (Plattform und Modell) zu charakterisieren. Die Messungen umfassen die Performance auf vier verschiedenen Recheneinheiten (CPU, GPU, VPU & TPU). Die Berechnungen auf der Grafikkarte wurden noch einmal in drei verschiedene Anwendungsfälle unterteilt. Mit Compute Unified Device Architecture (CUDA) wird das Modell standardmäßig, ohne weitere Anpassungen, auf der GPU ausgeführt. TensorRT führt hingegen gerätespezifische Optimierungen am Netzwerk aus, um bessere Ausführungszeiten zu erreichen. Zusätzlich kann die Performance noch weiter optimiert werden, indem die Parameter des Modells von 32 Bit (full precision) auf 16 Bit (half precision) heruntergerechnet werden.

Bei der Ausführung eines Modells muss das transiente Verhalten des Systems betrachtet werden. Dieser „Warmup“ umfasst den Zeitraum vom Laden des Netzwerkes bis zur Berechnung des ersten Inputs. In dieser Periode werden Speicher allokiert und ggf. Optimierungen am Modell durchgeführt. Eine gesonderte Betrachtung der Warmup-Zeit ist nützlich, um einschätzen zu können, wie viel Zeit benötigt wird bis die Anwendung einsatzbereit ist. Alle darauffolgenden Berechnungen werden als „Inference“ bezeichnet. Hier wird mit dem zuvor geladenen und optimierten Modell gearbeitet, wodurch weniger Rechenzeit benötigt wird.

Die Warmup- und Inference-Zeiten scheinen eine umgekehrte Proportionalität zueinander aufzuweisen, wie Abbildung 6 zu entnehmen ist. Dementsprechend muss bei der Anwendung zwischen schneller Verfügbarkeit und hoher Framerate (im Falle von Objektdetektion) abgewogen werden. Für Echtzeit Videostreaming (30Hz+) würden sich ausschließlich TPU und GPU anbieten. Letztere kann durch Optimierungen noch einen erheblichen Performancegewinn erzielen. Die VPU weist in diesem Anwendungsfall keine nennenswerten Vorteile gegenüber der CPU auf.

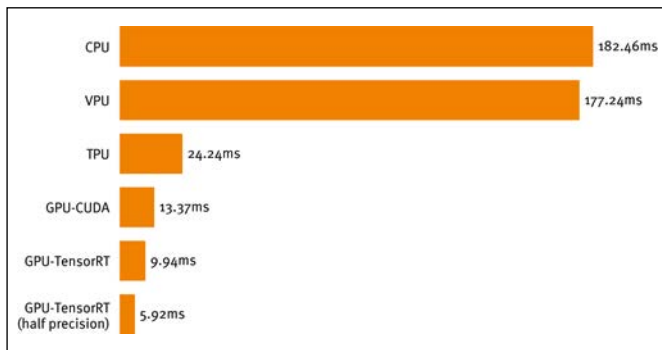
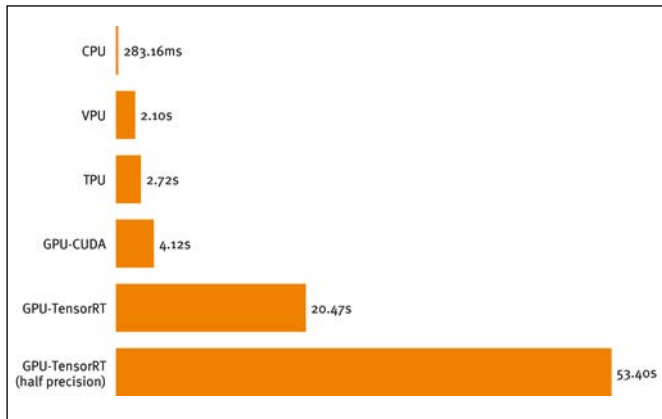


Abbildung 6: TinyYOLOv4 Warmup-Zeit (oben) und Inference-Zeit (unten)

Im Embedded-Bereich ist vor allem der Energiebedarf ausschlaggebend, um eine Anwendung möglichst kompakt gestalten zu können. Für die Ergebnisse aus Abbildung 7 wurde die mittlere Leistungsaufnahme der Plattform im Leerlauf und unter Last bestimmt. Aus dem Produkt der Differenz und der Inference-Zeit (Abbildung 6) lässt sich der Energiebedarf eines Modelldurchlaufs bestimmen. Wie in der vorigen Grafik erzielen GPU und TPU die besten Ergebnisse, während die VPU auch aus energetischer Sicht keinen Vorteil gegenüber der CPU bietet.

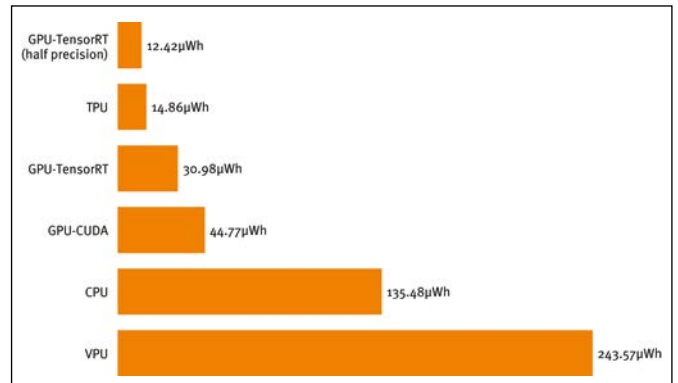


Abbildung 7: TinyYOLOv4 Energiebedarf pro Inference

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen schließen, dass Streaming-Anwendungen, welche kontinuierlich Daten mit demselben Modell auswerten, bevorzugt auf einer GPU ausgeführt werden sollten. Bestehende Anwendungen können stattdessen mit einer Edge-TPU ausgestattet werden, um Kosten zu sparen. Sollte schnelle Verfügbarkeit relevant sein, kann auf CPU-Inference gesetzt werden, dies hat zudem den Vorteil, dass keine spezialisierte Hardware benötigt wird.

5 Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Benchmark verwendet, um konsequente Datenverarbeitungspipelines zu definieren und diese in Form von Microservices auf eine statische Edge-Netzwerktopologie zu verteilen. Weiterhin werden dynamische Szenarien definiert, welche sich durch variable Verfügbarkeit von Rechenplattformen oder die Art der Verarbeitungsschritte auszeichnen. Intelligentes Scheduling soll eine optimale Taskverteilung ermöglichen und eine hohe Verfügbarkeit garantieren.

Referenzen:

- [1] Ausblick: Wirtschaft Digital 2030 – Statement von Andreas Scheuer, Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur. Available: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Video/2020/Wirtschaft-Digital/210511_digitalgipfel_pf1_andreas_scheuer/210511_digitalgipfel_pf1_andreas_scheuer.html [Zugriff am 16.8.2021].
- [2] „AI4DI“ [Online]. Available: <http://ai4di.eu/>. [Zugriff am 13.7.2020].
- [3] M. Schneider, S. Saadani und A. Höß, “Artificial Intelligence for Digitalizing Industry”, in Forschungsbericht 2020, Amberg, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2019, pp. 6-11.
- [4] M. Schneider, S. Saadani, R. Prokscha und A. Höß, „Testumgebung für Edge Computing in Intelligenten Transportsystemen (ITS)“ in Forschungsbericht 2021, Amberg, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2020, pp. 27-32.
- [5] Open Data License. Publisher: Tampereen kaupunki. Available: <https://www.tampere.fi/tampereen-kaupunki/tietoa-tampereesta/avo-in-data/avo-in-data-lisenssi.html>. [Zugriff am 13.7.2020].
- [6] Joseph Redmon et al. “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016.
- [7] Kaiming He et al. “Deep Residual Learning for Image Recognition”. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2016.
- [8] Jan Hosang et al. “Learning Non-maximum Suppression”. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017.
- [9] Wei Liu et al. “SSD: Single Shot MultiBox Detector”. In: Computer Vision – ECCV. 2016.
- [10] Joseph Redmon. Darknet: Open Source Neural Networks in C. 2013. Available: <http://pjreddie.com/darknet/>. [Zugriff am 13.7.2020].
- [11] Alexey Bochkovskiy, Chien-Yao Wang and Hong-yuan Liao. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. In: arXiv. 2020.

Projektpartner:



Acknowledgement:

AI4DI has received funding within the Electronic Components and Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU) in collaboration with the European Union's H2020 Framework Programme and National Authorities (in Germany Bundesministerium für Bildung und Forschung), under grant agreement n° 826060.



Kontakt:



Ruben Prokscha, M.Sc.

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

r.prokscha@oth-aw.de



Mathias Schneider, M.Eng.

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

mat.schneider@oth-aw.de



Seifeddine Saadani, M.Eng.

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

se.saadani@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

Cloning Optical Physical Unclonable Functions Using Machine Learning Attacks

Leah Lathrop, M.Sc.
Prof. Dr. Andreas Aßmuth
Prof. Matthias Söllner

Zusammenfassung

Mit Physical Unclonable Functions (PUFs) können eigentlich nicht unterscheidbare Instanzen von physikalischen Objekten, die aus der gleichen Produktionslinie stammen, eindeutig identifiziert werden. Unter den verschiedenen Arten von PUFs befinden sich optische PUFs. Zu den aktuellen Entwicklungen von optischen PUFs gehören integrierte optische PUFs, welche für die Integration in mikroelektronische Systeme geeignet sind. In dieser Arbeit wurde eine integrierte optische PUF als Laboraufbau realisiert und Angriffe darauf durchgeführt. Die Arbeit zeigt, dass Angriffe auf integrierte optische PUFs mit Machine-Learning möglich sind.

Abstract

Physical Unclonable Functions (PUFs) can be used to uniquely identify instances of physical objects that are otherwise constructed in the same way. Several different types of PUFs exist including optical PUFs. Current developments of the optical PUF include the integrated optical PUF which is practically feasible for the integration into microelectronic systems. In this work, the integrated optical PUF was implemented and attacked. Our research confirmed that attacks using machine learning on the integrated optical PUF are possible.

1 Introduction

Analogous to biometrics such as fingerprint detection, Physical Unclonable Functions (PUFs) can be used to uniquely identify individual instances of physical objects that are otherwise constructed in the same way. Cryptographic keys are derived from production tolerances, which cause inadvertent fluctuations in some of the characteristics of physical objects. An application example for PUFs is anti-counterfeiting. To distinguish genuine products from their counterfeit replicas, a trait to identify each individual object is advantageous. Moreover, prevention of forgery of a countermeasure must be ensured. Contrary to the targeted labeling of objects, manufacturing variations are frequently unwanted and cannot be controlled. Therefore, PUFs are a promising method of securing objects.

There are many different types of PUFs, including a category of PUFs called silicon PUFs that exploits tolerances in semiconductor production such as fluctuations in dopant

profiles. Such variations cause differences in physical sizes such as voltages. Electrical circuits are designed to evaluate them. The arbiter PUF, as shown in Figure 1, is an example of one of many different types of silicon PUF implementations. Several electrical components that each have two inputs and outputs are chained together forming two race tracks for electrical signals. A third input allows the configuration of the components as switched or straight. Electrical signals should theoretically arrive at the outputs at precisely the same time when applied to both inputs simultaneously. Production tolerances cause a minute discrepancy in their arrival times in practice [1]. The output of the PUF is a 0 or 1 based on whether the signal arrived at the top or bottom output first. When multiple arbiter PUF circuits are setup and they are configured in the same way, their outputs will be different and they can be distinguished by them. The inputs to a PUF, i.e., the configurations that can be applied are called challenges. The output of the PUF is called the response. Challenges with their corresponding responses are called Challenge-Response Pairs (CRPs) [2].

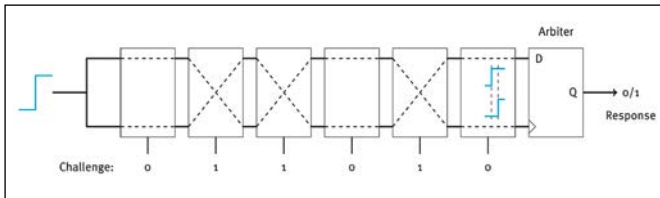


Figure 1: Arbiter PUF

The unique identifiers for Optical PUFs (OPUFs) are derived from patterns that result from a unique characteristic that is illuminated with coherent light. A diagram of the original implementation of the OPUF is shown in Figure 2. A plastic token that contains small glass spheres is illuminated with a laser. A pattern appears behind the token that can be photographed, e.g., with a Charge-Coupled Device (CCD) camera. Image processing is used to turn the resulting image into a cryptographic key. The glass spheres have random positions, resulting in differences in the patterns when the same challenge is applied to different tokens. Different challenges can be applied to a PUF token by changing the position at which the laser beam permeates the token. This is achieved by reflecting the laser off of a mirror, the position of which is changed using two actuators [3].

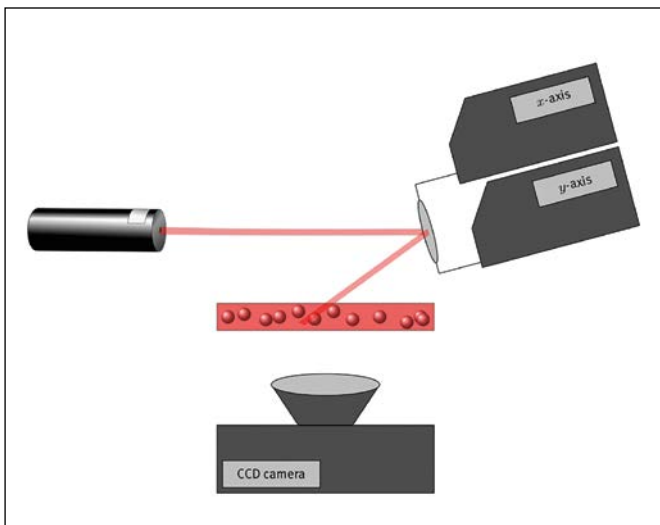


Figure 2: The original OPUF

A similarity between the original implementation of the OPUF and the arbiter PUF is that both allow configuration. PUFs to which many different challenges can be applied are called strong PUFs. Physically Obfuscated Keys (POKs) are another type of PUF which only have one challenge [2]. There are several other differences between strong PUFs and POKs. Machine learning attacks, which can be used to generate a mathematical model of a strong PUF, cannot be applied to POKs. A mathematical model of a PUF allows the generation of the response to any challenge of a PUF instance, when attackers are not in physical possession of it. Only a subset of all possible CRPs is needed to generate a model. Alternatively, a lookup table could be created that also allows the retrieval of any re-

sponse. However, attackers may not always be able to obtain all CRPs, e.g., when they do not have physical access to a PUF instance long enough to read out the responses to all challenges [4].

The original OPUF is not suited for integration into small microelectronic systems because there is no economically feasible method of changing the position of the laser beam or the token. The integrated OPUF, originally developed and attacked by Rührmair et. al. [5], was developed as a more practically attainable implementation of the OPUF. The integrated OPUF was set up and attacked in this work as a basis for further development and to gain new insights.

2 Integrated OPUF

2.1 The Integrated OPUF Setup

An example of one of the PUF tokens is shown in Figure 3a. The challenges are applied to the integrated OPUF by only letting light pass through a part of the token at one time [5]. This is achieved by placing a Liquid-Crystal Display (LCD) matrix between the expanded laser beam and the token. LCD matrices in combination with polarization filters can be used to allow light to pass through individual pixels and not others. In this project [6], the LCD matrix is configured as shown in Figure 3b. As shown in the diagram, only a part of the LCD matrix is required for challenge application, which will be referred to as the challenge window, while the rest of the screen is configured to block light. The challenge window is divided up into a number n of pixel groups, e.g., 16 in the example. Each pixel group can be configured to let light pass through or block it. All 2^n different challenge combinations can be applied to the token.

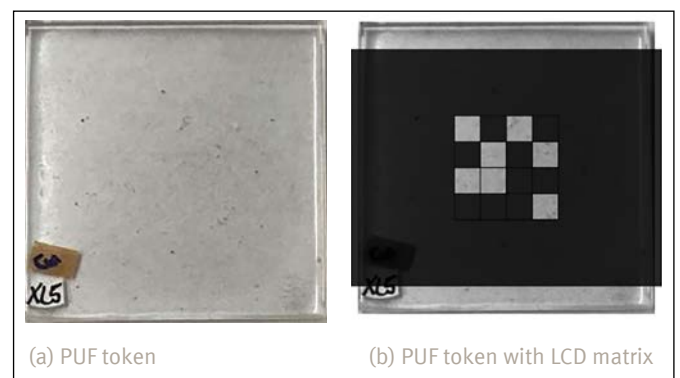


Figure 3: Challenge application to the integrated OPUF

Figure 4 shows the setup of the integrated OPUF. A laser with a wavelength of 532 nm and a power of 0.3 mW was used. The laser diameter is expanded to 1.2 cm using a Keplerian beam expander with a biconvex lens with a focal length of $f=50$ and a convex lens with a focal length of $f=200$. The LCD matrix is behind the token in the

center of the diagram. Another convex lens ($f=40$) was placed in front of the camera to adjust the pattern sizes. A Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) camera with a resolution of 4024×3036 pixels was used. The camera is 30 cm away from the token, which is still very large considering the targeted area of application. However, this setup still has the potential of becoming smaller with more development.

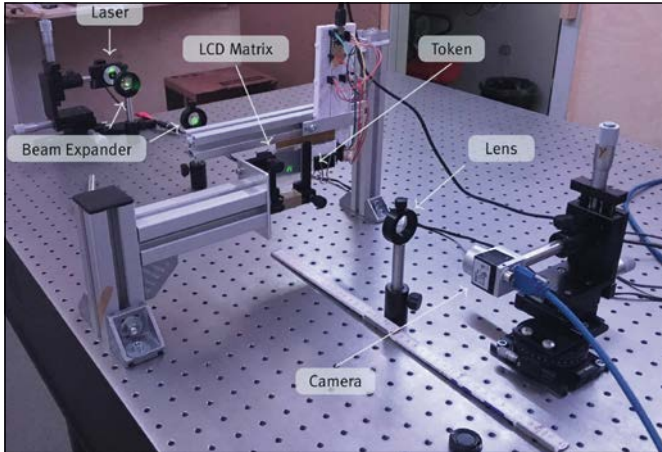


Figure 4: The setup of the integrated OPUF

An example of one of the resulting images is shown in Figure 5. A small part of the image was magnified to show the patterns.

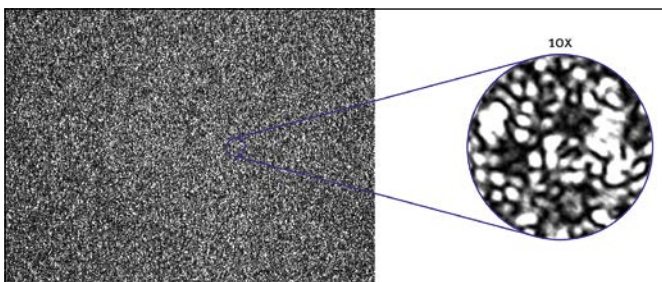


Figure 5: Image example

The setup was evaluated to determine the quality of the resulting cryptographic keys. The stability and uniqueness of PUFs need to be assessed to determine the quality of the keys and how far environmental influences have an affect. The stability must be evaluated to make sure a PUF instance can reliably be identified by its responses. The uniqueness must be explored to determine whether the instances can be distinguished when applying the same challenge to each instance. For the integrated OPUF, the differences between the keys when different challenges were applied to the same instance was also explored to determine how distinctive the responses were. The effect an increasing challenge size with a constant challenge window size had on the cryptographic keys was explored. The keys that resulted from the application of different challenges to the one token at one challenge size were compared. The average difference was recorded. As the challenge size increased, the keys became less similar to each other.

2.2 The Attack on the Integrated OPUF

Machine learning is a sub-area of artificial intelligence that allows computers to self-learn without being programmed explicitly [7]. In a type of machine learning called supervised learning, a sequence of inputs and outputs allows the prediction of other correct outputs that are not part of the original training set [8]. There is no analytical solution to determine optimal parameters for the model. Therefore, iterative methods have to be used. Linear regression is an example of an algorithm that can be used for supervised learning and can be used on continuous linear data that has the slope-intercept form $y=mx+b$. The algorithm can be used to predict values for m and b for which the most accurate output values can be predicted. An optimization algorithm specifies how the values of the coefficients are adjusted during each learning round based on how well the predicted values match the real ones. Multivariable linear regression can be used to apply the algorithm to functions that have multiple variables.

The different squares that light is allowed to pass through on the token each make a contribution to the pattern. Since all combinations of challenges are allowed, the same squares are allowed to let light pass through on several different challenges. The squares make the same contribution at each challenge. The light combines at the individual image pixels. The brightness of an individual pixel depends on what squares are making a contribution at a specific challenge. Therefore, a function can be set up for each pixel that has the challenges as the inputs and their corresponding pixel values as the outputs. Linear regression can be used with CRPs that attackers have. The function can then be used to predict the response values for challenges the attackers do not have. Multivariable linear regression was used with the resilient propagation optimization algorithm for this work [6]. We carried out the attack on squares of 50×50 image pixels to decrease the computation time while still being able to study the behavior of the attack.

We were able to successfully carry out the attack with the required accuracy for 8-bit, 16-bit, and 32-bit challenge sizes for one challenge window size with minimum numbers of CRPs of 75, 300, and 600 CRPs respectively. The numbers of CRPs needed to achieve the required accuracies rose with challenge size. This aligns with what was found during the evaluation (described at the end of Section 2.1), that the keys are more different as the challenge size increases. The attack was carried out successfully in the original work by Rührmair et. al. [5] with a 225-bit challenge size and only 300 CRPs. This could be attributed to less fine patterns that appear in their images. The total attack times for the 50×50 pixel images were between 30 and 40 min. depending on the challenge sizes and number of CRPs used. The estimated attack times for the whole images are 15 to 19 weeks [6].

3 Conclusion and Further Work

In our work we successfully set up and attacked an integrated OPUF. In comparison to the original work by Rührmair et al., more CRPs would be needed to create a model for the same challenge size successfully. Further work on this topic is twofold. The attack can be improved and explored in greater detail, e.g., other machine

learning algorithms can be explored to improve it and the attack can be carried out with higher challenge sizes. The integrated OPUF must also be improved. The size of the integrated OPUF must be reduced and the resistance of the integrated OPUF to machine learning attacks must be increased. This could be achieved by exploring different ways of making the token.

References:

- [1] Daihyun Lim. Extracting Secret Keys from Integrated Circuits. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 2004.
- [2] Roel Maes and Ingrid Verbauwhede. Physically Unclonable Functions: A Study on the State of the Art and Future Research Directions. In *Towards Hardware-Intrinsic Security*, pages 3-37. 2010.
- [3] Pappu Srinivasa Ravikanth. Physical One-Way Functions. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, March 2001.
- [4] Ulrich Rührmair and Jan Sölter. PUF Modeling Attacks: An Introduction and Overview. In *2014 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, March 2014.
- [5] Ulrich Rührmair, Christian Hilgers, Sebastian Urban, Agnes Weierhäuser, Elias Dinter, Brigitte Forster, and Christian Jirauschek. Optical PUFs Reloaded. IACR Cryptology ePrint Archive, May 2013. URL: ia.cr/2013/215 [accessed: 2021-09-11].
- [6] Leah Lathrop. Machine Learning Attacks on Physical Unclonable Functions. Master's thesis, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, September 2021.
- [7] Pinky Sodhi, Naman Awasthi, and Vishal Sharma. Introduction to Machine Learning and Its Basic Application in Python. In *Proceedings of 10th International Conference on Digital Strategies for Organizational Success*, 2019.
- [8] Gunnar Rätsch. A Brief Introduction to Machine Learning. 21st Chaos Communication Congress, 2004. URL: <https://events.ccc.de/congress/2004/fahrplan/files/105-machine-learning-paper.pdf> [accessed: 2021-09-12].

Kontakt:



Leah Lathrop, M.Sc.

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



Prof. Dr. Andreas Aßmuth

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

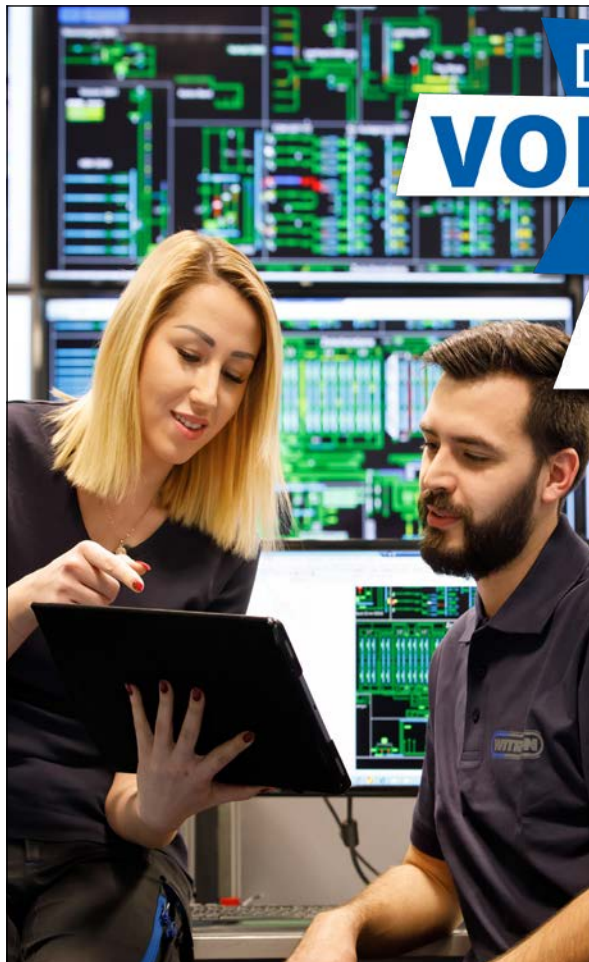
a.assmuth@oth-aw.de



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



DER VOLLTREFFER FÜR DEINE KARRIERE

Praktikum • Abschlussarbeit • Werkstudententätigkeit • Direkteinstieg

- Informatik
- Maschinenbau
- Elektrotechnik
- Betriebswirtschaftslehre

Werde Teil der spannenden Welt der Intralogistik
Informationen zu allen Studiengängen findest du unter

karriere.witron.de



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.

Volksbank Raiffeisenbank
Nordoberpfalz eG



Zusammenfassung

Im Labor für Strömungstechnik an der OTH Amberg-Weiden wird ein Prüfstand zur kompletten Vermessung der Energiewandlungskette einer Kleinwindenergieanlage zur Ladung von elektrischen Energiespeichern aufgebaut. Es wird eine KWEA (AirForce 1) unter Belastung einer elektronischen Last als Vergleichsmaßstab und zweier Laderegler (WindMax1000 und TriStar TS45) vermessen. Die aerodynamische Auslegung des Rotors des Horizontal-talläufers wird mit numerischer Strömungssimulation (STAR-CCM+) und einer analytischen Berechnungsmethode (Blade-Element-Momentum, Qblade) nachgerechnet und mit Prüfstandsmessungen verglichen.

Abstract

In the laboratory for Fluid Mechanics at the OTH Amberg-Weiden, a test rig is being set up for the complete measurement of the energy conversion chain of a small wind turbine for charging electrical energy storage systems. A wind turbine (AirForce 1) is measured under load of an electronic load as a benchmark and two charge controllers (WindMax1000 and TriStar TS45). The aerodynamic design of the rotor of the horizontal axis wind turbine is recalculated with numerical flow simulation (STAR-CCM+) and an analytical calculation method (Blade-Element-Momentum, Qblade) and compared with test bench measurements.

1 Einleitung

Kleinwindenergieanlagen (KWEA) als Akkulader gelangen durch die Thematisierung der Energiewende zunehmend in das Interesse der Öffentlichkeit und der angewandten Forschung im Bereich erneuerbarer Energien [1,2]. Es gibt international und national diverse Definitionen zum Begriff der KWEA, wobei hier der Fokus auf Anlagen im Bereich einer elektrischen Nennleistung von bis zu 5 kW_{el} gelegt werden soll. Diese eignen sich in Verbindung mit einem auf die Anlage angepassten Laderegler zur Aufladung von Akkumulatoren in Anwendungen der dezentralen Stromversorgung (z. B. Gebäudeenergieversorgung oft in Kombination mit PV-Modulen, Speisung von Verkehrs- und Telekommunikationsanlagen, Speisung von landwirtschaftlichen Anwendungen, z. B. elektrische Weidezäune oder Wasserpumpen, Versorgung von Segelyachten und Wohnmobilen). Das Angebot an unterschiedlichen KWEA mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien und spezifischen Vor- und Nachteilen (Horizontal- bzw. Vertikalläufer, Widerstandsprinzip oder Nutzung des

aerodynamischen Auftriebs) ist sehr groß und unübersichtlich. Da die Leistungsbeiwerte solcher Anlagen nur sehr schwierig und aufwendig zu ermitteln sind (z. B. durch teure Windkanalversuche), bieten nur sehr wenige Hersteller wirklich belastbare Leistungskennlinien ihrer Anlagen an.

Weiterhin bieten nur einige Hersteller einen auf das System optimal abgestimmten Laderegler an. Kauft man einen (parametrisierbaren) Laderegler von einem anderen Hersteller zu, ergeben sich Abstimmungsprobleme, die den Energieertrag entscheidend beeinflussen können. Daher steht im Fokus des Projekts die Beurteilung der gesamten Energiewandlungskette einer elektrischen Stromversorgung mit KWEA von der Rotoraerodynamik, über den Generator, Gleichrichter bis zum Laderegler. Im Labor für Strömungstechnik an der OTH Amberg-Weiden werden daher Prüfstände zur Vermessung von KWEA (bis zu einem Durchmesser von 2 m), Generatoren bis zu ca. 1,5 kW_{el} und Laderegler aufgebaut. Es wird die für die Vermessung sehr gut geeignete Anlage AirForce 1

(Nennleistung 1 kW_{el} , Durchmesser $1,75 \text{ m}$) des britischen Herstellers FuturEnergy Ltd zusammen mit geeigneter Akkuladetechnik beschrieben. Der Hersteller vertreibt auch einen auf die Anlage angepassten Laderegler TriStar TS-45 (Prinzip PWM), welcher getestet wird. Zusätzlich wird ein Laderegler des bayerischen Herstellers Schams-Electronic (WindMax1000, Prinzip MPPT bzw. programmierbare Kennlinie) getestet. Da die Messungen auf dem Prüfstand für KWEA nicht direkt mit einer Messung z. B. in einem großen Windkanal verglichen werden können, wird zusätzlich eine Strömungssimulation und eine Nachrechnung mit der Software Qblade (TU Berlin) durchgeführt.

Letztendlich wird eine Prüfplattform für die gesamte Energiewandlungskette von KWEA entwickelt, die es ermöglichen soll, Herstellern ihre Komponenten unabhängig testen zu lassen, aber zusätzlich auch fortgeschrittenen Studierenden der Energietechnik eine vertiefte praktische Ausbildung im Fach Windenergienutzung zu vermitteln.

2 Vorgehensweise

Zunächst werden die Prüfstände für KWEA und nachfolgende Energiewandler sowie die verwendete Messtechnik beschrieben. Danach wird die aerodynamische Auslegung der zu untersuchenden Windturbine mit der Software Qblade überprüft. Schließlich wird die Prüfstandskonfiguration mit der CFD-Software Simcenter STAR-CCM+ simuliert und die Ergebnisse werden mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Da Qblade kein radialsymmetrisches Windgeschwindigkeitsprofil vor der Windturbine verarbeiten kann, wird die Simulation zusätzlich auch mit konstanter Windgeschwindigkeit vor der Turbine durchgeführt. Die so erhaltenen Ergebnisse können dann wieder mit denen von Qblade verglichen werden.

2.1 Prüfstand für KWEA

Zur Vermessung der Leistungskennlinie von Windenergieanlagen können bei großen Anlagen Freifeldvermessungen oder Tests in Windkanälen mit Modellen durchgeführt werden, wobei der Blockadefehler zu berücksichtigen und zu korrigieren ist. Weiterhin sind Fehler bei Verletzung der Kennzahl nach Reynolds bei Umströmung der Tragflügelprofile zu berücksichtigen. Beide Methoden sind jedoch mit viel Aufwand verbunden. Daher werden für die Entwicklung großer Windturbinen und zunehmend auch für kleine Windturbinen neben analytischen Methoden (z. B. Qblade) die Methode der Strömungssimulation (CFD Computational Fluid Dynamics) eingesetzt.

Um den Aufwand zum Testen von KWEA in Grenzen zu halten, wird eine Prüfmethode entwickelt, bei der ein mit einem drehzahlvariablen Elektromotor angetriebener Propeller eine definiert inhomogene Anströmung erzeugt, vgl. Abbildung 1.

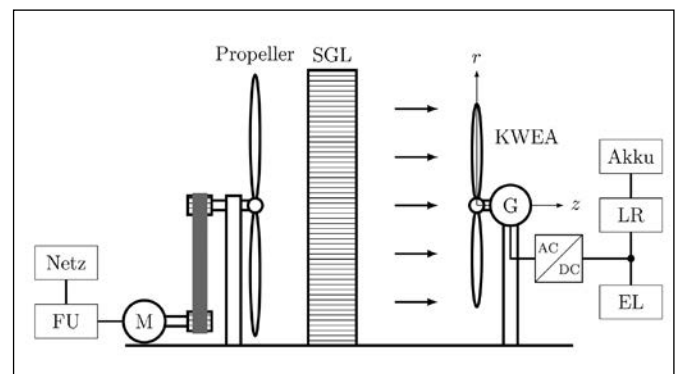


Abbildung 1: Prüfstand für KWEA (FU Frequenzumrichter, SGL Strömungsgleichrichter, LR Laderegler, EL elektronische Last).

Nach dem Propeller ist ein Strömungsgleichrichter aus sehr dünnwandigem Kunststoff (Länge in z-Richtung 160 mm , quadratische Kanäle mit $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) angeordnet, der die tangentielle Strömungskomponente, die der Propeller erzeugt, eliminiert und die Größe der turbulenten Wirbel auf maximal 10 mm reduziert. Dennoch verbleibt bei dieser Methode der Strömungserzeugung ein definiertes radialsymmetrisches Geschwindigkeitsprofil. Nach dem SGL an der Position $z = -1.200 \text{ mm}$ (der Koordinatenursprung befindet sich in der Rotorebene der Windturbine) befindet sich der Rotor ($z = 0 \text{ mm}$), der direkt einen permanent-erregten Drehstrom-Synchrongenerator antreibt. Nach dem Generator ist ein Brückengleichrichter (Typ B6) verbaut. Die DC-Nennspannung des Generators wird vom Hersteller mit 48 V angegeben. Je nach Testzweck folgt entweder eine elektronische Last zur definierten Belastung und Leistungsmessung des Generators bzw. ein Laderegler und 4 Gel-Bleiakkus, die unterschiedlich verschaltet werden können, um Laderegler für 48 V oder 24 V -Systeme zu vermessen.

Da zur Vermessung der Leistungskennlinie die Ermittlung der mechanischen Leistung erforderlich ist, kann diese nur durch Rückrechnung aus der an elektronischen Last gemessenen elektrischen Leistung bestimmt werden. Hierzu ist eine präzise Vermessung der lastabhängigen Wirkungsgrade des Generators sowie des Gleichrichters erforderlich. Da auch hier üblicherweise keine verlässlichen Herstellerangaben vorliegen, werden diese Wirkungsgradkennlinien auf einem selbst entwickelten Generatorprüfstand (drehzahlvariablen Elektromotor, der den Generator antreibt, ausgestattet mit einer Drehmomentmesswelle) vermessen. Die Belastungspunkte des Generators entsprechen dabei genau denen, die am Prüfstand für KWEA eingestellt werden. Zur Vermessung der Laderegler werden die Gel-Bleiakkus vor jeder Messreihe, ausgehend vom vollen Ladezustand auf 85% ihrer Nennkapazität, entladen, um definierte Versuchsbedingungen zu schaffen.

Eine besondere Betrachtung verlangt das Windgeschwindigkeitsprofil $u_z(r)$ nach dem Strömungsgleichrichter, das zur Bestimmung der Leistung der Anströmung der Windturbine ermittelt werden muss. Die Leistung der Strömung vor der Turbine

$$P_{Wind} = \rho \pi \int_0^R u_z(r)^3 r dr = \rho \frac{D^2 \pi}{8} v_{1,eff}^3$$

kann durch Integration des axialsymmetrischen Geschwindigkeitsprofils $u_z(r)$ über die durchströmte Rotorfläche berechnet (ρ Luftdichte im Labor, D Rotordurchmesser, R Rotorradius) und auch eine effektive, leistungsgemittelte Windgeschwindigkeit $v_{1,eff}$ bestimmt werden, die für weitere Betrachtungen z. B. die Auswertung des Parameters TSR (Tip Speed Ratio bzw. auch Schnelllaufzahl bezeichnet)

$$TSR = \frac{\omega R}{v_{1,eff}}$$

benötigt wird. Das TSR als Verhältnis der Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblattspitze (ω Winkelgeschwindigkeit der Turbine, bestimmt aus einer optischen Drehzahlmessung der Turbine) ist der wesentliche Auslegungsparameter für das aerodynamische Design der Turbine. Die vom Rotor abgegebene mechanische Leistung P_{mech} wird durch Messung der elektrischen Leistung an der elektronischen Last im jeweiligen maximalen Leistungspunkt unter Berücksichtigung der lastabhängigen Wirkungsgrade von Generator und Gleichrichter ermittelt. Der dimensionslose Leistungsbeiwert

$$c_p = \frac{P_{mech}}{P_{Wind}}$$

einer Windturbine wird hier, bezogen auf die mechanische Leistung des Rotors, verwendet.

Die für die Auswertung benötigten radialen Windgeschwindigkeitsprofile werden an verschiedenen Positionen z mit einem kalibrierten Flügelradanemometer vermessen. Da zum Vergleich mit der Strömungssimulation auch die radiale Verteilung der Turbulenzintensität nach dem Strömungsgleichrichter als Randbedingung wichtig ist, wird diese mit einem Hitzdrahtanemometer vermessen. Weiterhin wird die radiale Verteilung des statischen Relativdrucks an verschiedenen z -Positionen mit einem Staurohr nach Prandtl vermessen.

2.2 Aerodynamische Auslegung und Berechnung mit Qblade

Da der aerodynamische Entwurf von Rotorblättern für große Windturbinen mit CFD-Methoden in der industriellen Praxis derzeit noch sehr aufwendig ist, hat sich die

FG Experimentelle Strömungsmechanik an der TU Berlin zum Ziel gesetzt, eine Open-Source-Software zu entwickeln, die die BEM-Methode (Blade Element Momentum) in Kombination mit der bekannten Open-Source-Software XFOIL (für die benötigten Tragflügelprofile) nutzt. Mit dieser Software können aerodynamische Designstudien sehr effizient durchgeführt werden. Allerdings können mit diesem Ansatz 3-dimensionale Strömungseffekte (Nabe, Tragflügelspitze, Druckunterschiede in radialer Richtung auf der Tragflügeloberfläche, Coriolis- und Zentrifugalkräfte) nur durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Um ein Design in Qblade aufzubauen, müssen zunächst grundlegende Parameter der Windturbine (TSR = 4,5, Flügelszahl 5, Rotordurchmesser $D = 1,75$ m) festgelegt werden. Über diese Parameter und grundlegende analytische Zusammenhänge des Entwurfs von Windturbinen (Theorie von Betz und Schmitz), siehe z. B. Gasch [3], lassen sich Tragflügeltypen, Reynoldszahlen und Anströmwinkel der Profile berechnen. Zur Auswahl von Tragflügelprofilen für Windturbinen kann man auf bewährte Profilkataloge für die Luftfahrt (z. B. NACA-Profile, Göttinger Profile) oder auf spezielle Profilkataloge für Windturbinen (z. B. NREL-Profile für niedrige Reynoldszahlen, DU-Profile für hohe Reynoldszahlen) zurückgreifen. Für die zu untersuchende Windturbine AirForce 1 wird ein Flügel exakt vermessen (Tragflügeltypen, Anstellwinkel und Profileigenschaften), und die erhaltenen Daten werden in Qblade eingetragen. In Abbildung 2 ist die radiale Verteilung der Profiltypen dargestellt. Die Konstrukteure der AirForce 1 haben verschiedene 4 Digit-NACA-Profile ausgewählt.

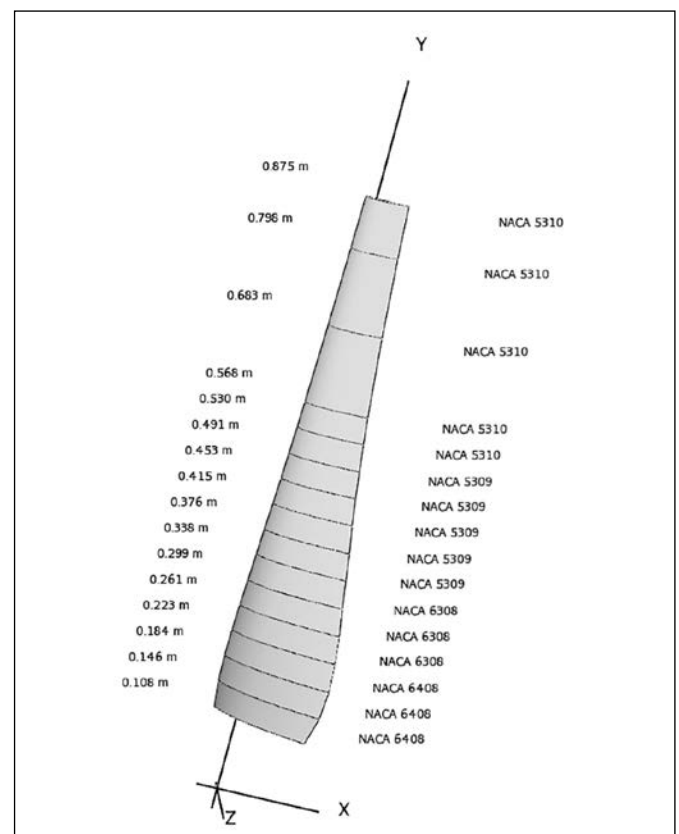


Abbildung 2: Rotorblattdesign der AirForce 1 in Qblade (radiale Verteilung der Profile).

Nach der Definition des Rotorblatts ist eine Berechnung des Leistungsbeiwerts in Abhängigkeit des Parameters TSR nach der BEM-Methode möglich.

2.3 Strömungssimulation

Exakt dieselben Rotorblätter werden zum Aufbau eines Strömungssimulationsmodells mit der CFD-Software STAR-CCM+ verwendet. Hierzu ist die Form der Nabe und der Verkleidung des Generators anhand des Originals nachzubilden, vgl. Abbildung 3 (links). Die Hauptabmessungen des Simulationsmodells sind in Abbildung 3 (rechts) dargestellt und wurden so gewählt, dass nahezu keine Blockadeeffekte auftreten und der Nachlauf abgebildet werden kann. Die Rotorebene liegt in einer Entfernung von 1.200 mm (wie am Prüfstand) vom Eintritt der Strömung entfernt. Hier werden das am Prüfstand vermessene Geschwindigkeitsprofil $u_z(r)$ sowie die vermessenen Turbulenzgrößen als Randbedingung aufgeprägt. Die Seitenflächen der durchströmten Geometrie sind als reibungsfreie Berandungen definiert. Am Auslass wird als Randbedingung Umgebungsdruck aufgeprägt. Die Simulation wird mit folgenden Festlegungen durchgeführt: stationär, inkompressibel, RANS, SIMPLE-Algorithmus, MRF-Methode für den Rotor, Turbulenzmodell $k-\omega$ -SST bei relevanten Oberflächen ohne Wandfunktionen (Tragflügeloberflächen mit $y_{plus} < 1$), Polyedernetz mit prismatischen Wandzellen mit ca. 8 Millionen finiten Volumina.

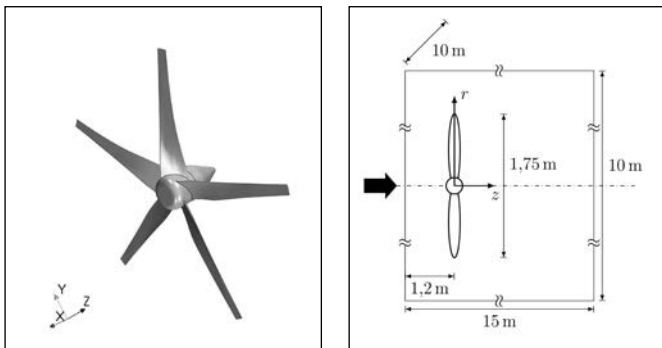


Abbildung 3: links: Rotorgeometrie, rechts: Hauptabmessungen des Simulationsmodells.

3 Ergebnisse

In Abbildung 4 ist ein Vergleich der mechanischen Leistungen, ermittelt durch Prüfstandsmessungen und Simulation, aufgetragen. In jedem Betriebspunkt, d. h. bei einer definierten effektiven Anströmgeschwindigkeit $v_{1,eff}$ wird dazu die Belastung durch die elektronische Last so variiert, dass sich die maximale Leistung einstellt. Aus der Drehzahl des Rotors und $v_{1,eff}$ wird dann das TSR ermittelt. Hier sollten dann die Strömungsverhältnisse am Rotorblatt optimal sein. Die gleiche Drehzahl wird dann in der Simulation verwendet.

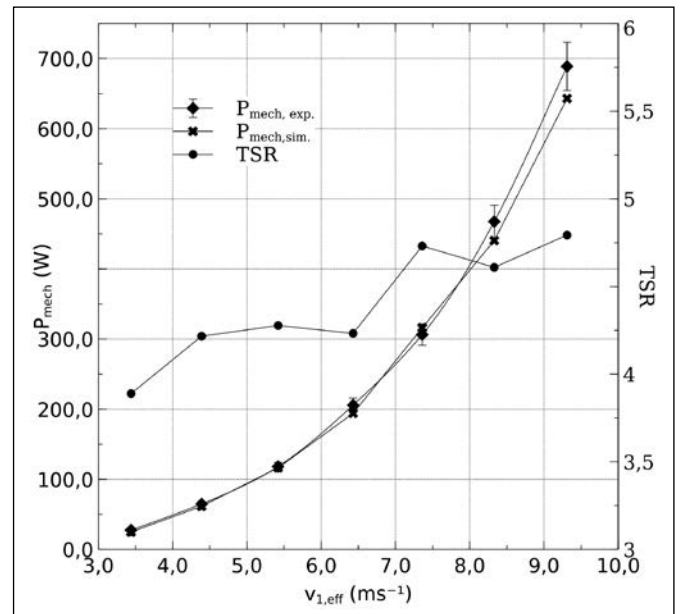


Abbildung 4: Vergleich der mechanischen Leistungen des Rotors aus der Prüfstandsmessung und der Strömungssimulation.

In Abbildung 5 ist für eine definierte, homogene Anströmgeschwindigkeit $v_1 = 10$ m/s ein Vergleich zwischen Qblade und Strömungssimulation aufgetragen. Der Parameter TSR wurde rund um den Auslegungspunkt (TSR = 4,5) variiert. Zwei verschiedene Modelle in Qblade für die Tip-Loss-Korrektur („Prandtl“ und „new“) werden dabei berücksichtigt.

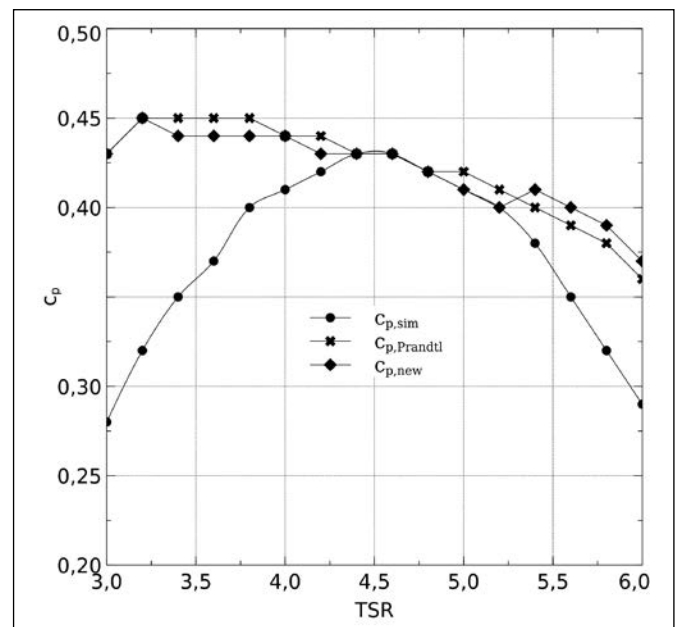


Abbildung 5: Leistungsbeiwert c_p des Rotors ermittelt mit Qblade (Indices Prandtl und new) und Strömungssimulation (Index sim) bei Variation von TSR.

In Abbildung 6 wird die elektrische Leistung der KWEA an der elektronischen Last verglichen mit den Ladeleistungen, die zwei verschiedene Modelle an die Akkumulatoren liefern.

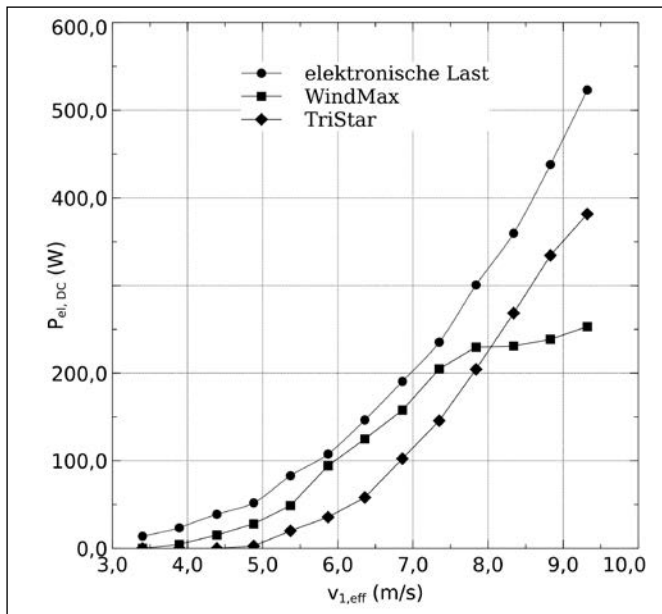


Abbildung 6: Vergleich der Ladeleistungen zweier Laderegler mit der Leistung an der elektronischen Last als Vergleichsmaßstab.

In Abbildung 7 ist das jeweilige TSR dargestellt, das bei Belastung der KWEA mit elektronischer Last und den beiden untersuchten Laderegler erreicht wird.

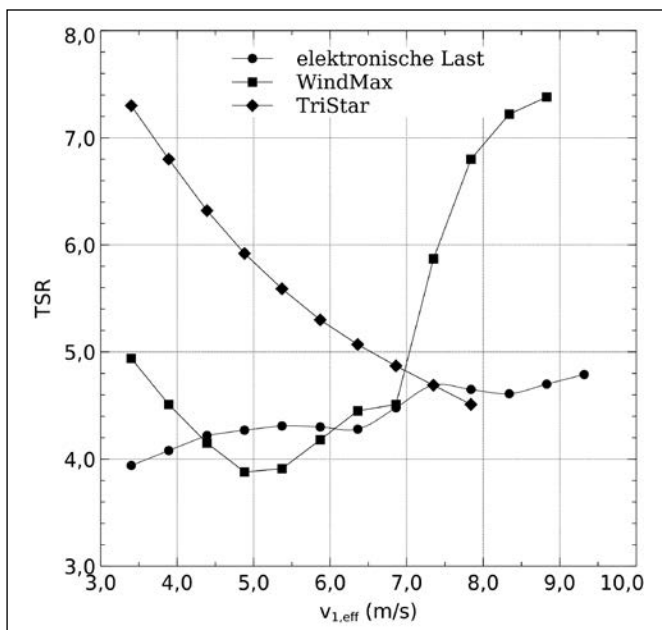


Abbildung 7: Vergleich des Parameters TSR zweier Laderegler und an der elektronischen Last als Vergleichsmaßstab.

4 Diskussion

Die in Abbildung 4 dargestellten mechanischen Rotorleistungen, die am Prüfstand ermittelt und mittels Strömungssimulation nachgerechnet werden, zeigen eine gute Übereinstimmung. Das am Prüfstand ermittelte TSR variiert leicht über der effektiven Windgeschwindigkeit um einen Mittelwert von ca. 4,5, was dem Auslegungswert entspricht. Dieses Verhalten war vorab nicht zu erwarten, da die aerodynamische Auslegung der Windturbine für eine gleichmäßige Anströmung, wie es

z. B. in Qblade realisiert ist, erfolgt. Daher können am Prüfstand ermittelte Leistungsbeiwerte nicht direkt mit solchen gleichgesetzt werden, die für eine gleichmäßige Anströmung, wie sie z. B. im Windkanal erreicht wird, gleichgesetzt werden. An einer möglichst allgemeingültigen Übertragungsfunktion von Messergebnissen für den Leistungsbeiwert und TSR vom Prüfstand auf gleichmäßige Anströmung wird in einem Folgeprojekt gearbeitet.

In Abbildung 5 werden die Ergebnisse für die Leistungsbeiwerte der AirForce 1, ermittelt mit Qblade und der Strömungssimulation für gleichmäßige Anströmung exemplarisch bei $v_1 = 10$ m/s, verglichen. Dabei wird der Parameter TSR durch Änderungen der Rotordrehzahl variiert. Die Strömungssimulation zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei $TSR=4,5$, was zu erwarten ist, da $TSR=4,5$ dem Auslegungsfall entspricht. Abweichungen nach oben und nach unten führen zu Fehlanströmungen der Tragflügelprofile, d. h. von der optimalen Gleitzahl wird abgewichen. Qblade zeigt im Auslegungsfall eine perfekte Übereinstimmung mit der Strömungssimulation, kann aber Abweichungen davon nicht mehr korrekt abbilden. Die Ursache für die Abweichungen ist vermutlich in fehlerhaften Tragflügelprofilen (bedingt durch die Änderung der Reynoldszahl) zu suchen. Die beiden angewandten Tip-Loss-Modelle haben nur einen sehr geringen Einfluss auf das Ergebnis. Eine systematische Untersuchung in diesem Bereich erscheint auch hinsichtlich der aerodynamischen Auslegung von großen Windturbinen sehr interessant zu sein.

Die Abbildung 6 zeigt die unterschiedlichen Ladeleistungen der beiden Laderegler im Vergleich zur elektronischen Last. Der Laderegler WindMax im Kennlinienmodus zeigt vor allem bei schwächeren und mittleren Windgeschwindigkeiten bis 7 m/s eine deutlich bessere Ladeleistung im Vergleich zum TriStar. Bei höheren aber eher seltenen Windgeschwindigkeiten zeigt der TriStar eine bessere Ladeleistung. In Abbildung 7 zeigt sich deutlich, dass eine schlechte Ladeleistung mit einer falschen Belastung der KWEA einhergeht. Das heißt, die KWEA wird weit weg vom aerodynamischen Auslegungspunkt betrieben. Ein optimaler Laderegler sollte die KWEA immer so belasten, dass sie im Auslegungspunkt läuft.

5 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Die im Labor für Strömungstechnik aufgebaute Prüfstandstechnik (für Windenergieanlage, Generator, Gleichrichter und Laderegler) erlaubt die komplette Vermessung und Optimierung der Energiewandlungskette einer Kleinwindenergieanlage (KWEA) zum Laden von Akkumulatoren. Der aerodynamische Entwurfsprozess einer KWEA mit den Werkzeugen Qblade und der numerischen Strömungssimulation kann anhand der Messergebnisse verifiziert werden. Es wird gezeigt, dass zumindest für die AirForce 1 bisher kein Laderegler auf dem Markt ist, der

den gesamten nutzbaren Bereich der Windgeschwindigkeiten abdeckt. Allerdings zeigt der Laderegler Wind-Max1000 bei den typischen Windgeschwindigkeiten im Binnenland ein befriedigendes Verhalten, das aber noch weiter optimiert werden kann. Dazu kooperiert der Hersteller mit dem Labor für Strömungstechnik. In weiteren geplanten Projekten soll ausgehend von den bisherigen Erfahrungen eine eigene kostengünstige und aerodyna-

misch optimierte KWEA entwickelt und getestet werden. Weiterhin soll eine möglichst allgemeingültige „Übertragungsfunktion“ von Messergebnissen auf dem Prüfstand (Leistungsbeiwert c_p und TSR) auf Windkanalergebnisse gefunden werden. Ein vielversprechendes Projekt ist auch die weitere Untersuchung der Übereinstimmung von Qblade und numerischer Strömungssimulation bei vom Auslegungszustand abweichenden Betriebszuständen.

Referenzen:

- [1] S. Drouilhet, E. Muljadi, R. Holz, V. Gevorgian, “Optimizing Small Wind Turbine Performance in Battery Charging Applications”, NREL/TP-441-7808, UC Category 1213, DE95009211, May 1995.
- [2] Kleinwindenergieanlagen – Hintergrundinformationen und Handlungsempfehlungen, C.A.R.M.E.N. e.V. (Hrsg.), Straubing, 2021.
- [3] R. Gasch und J. Twele, Windkraftanlagen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2005.

Projektpartner:

Schams-Electronic, Bergau (Laderegler)

Fördergeber:

Technologie- und Wissenschaftsnetzwerk Oberpfalz (TWO)
in Kooperation mit der OTH Amberg-Weiden und der OTH Regensburg

Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer

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

s.beer@oth-aw.de

Zusammenfassung

Softwaretools zur Energiesystemmodellierung ermöglichen auf Basis von Algorithmen die Darstellung des Optimums von Energiesystemen entlang einer festgesetzten Zielgröße. Dabei gibt es kostenlose, quelloffene sowie auch kommerzielle, kostenpflichtige Tools, die sich in Handhabung, Zugänglichkeit, Schnittstellen und weiteres unterscheiden. An dieser Stelle werden zwei Tools betrachtet: die quelloffene python-basierte Toolbox oemof (open energy modeling optimization framework) und die kommerzielle Software Top Energy. Anhand von Beispielen werden die Grundlagen der digitalen Energiesystemoptimierung veranschaulicht und deren Potentiale beschrieben. Dieser Beitrag zielt darauf ab, einen anschaulichen und praxisorientierten Einblick in die Energiesystemmodellierung zu Forschungszwecken sowie für die Anwendung zu geben.

Abstract

Software tools for energy system modelling enable the representation of the optimum of energy systems along a defined target value on the basis of algorithms. There are free, open-source tools as well as commercial, fee-based tools that differ in terms of handling, accessibility, interfaces and more. Two tools are considered here: the open source Python-based toolbox oemof (open energy modelling optimisation framework) and the commercial software Top Energy. Examples are used to illustrate the basics of digital energy system optimisation and to describe its potential. This paper aims to provide a clear and practical insight into energy system modelling for research purposes as well as for its application.

1 Einleitung

Die Bundesregierung hat die Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 beschlossen. Bestrebungen zur Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung im Bereich der Energieerzeugung und -bereitstellung werden die nächsten Jahrzehnte dabei entscheidend prägen. Der zunehmende Anteil erneuerbarer, fluktuierender Energien und die damit verbundene dezentrale Energieerzeugung führt zu einer stetig steigenden Komplexität und Flexibilität. Die Herausforderungen und Chancen dieser Transformation gilt es zu überwinden und zu nutzen. Um diesen Komplexitätsansprüchen gerecht zu werden, werden die Energiebereitstellung und -versorgung zunehmend durch digitale Tools und Methoden unterstützt.

2 Lineare Optimierung

Die lineare Optimierung bzw. lineare Programmierung (LP) ist eine Teildisziplin der mathematischen Optimierung, bei der das Problem mit linearen Gleichungen beschrieben werden kann. Dabei wird eine, der Problemstellung entsprechende, Zielfunktion definiert, deren minimaler oder maximaler Zielwert über die Lösung des linearen Gleichungssystems bestimmt wird. Die Lösungsmenge kann entsprechend der Problemstellung durch Nebenbedingungen eingeschränkt werden. Der Lösungsalgorithmus ist im sog. Solver als separates mathematisches Programm gespeichert [1].

Neben der in dieser Arbeit behandelten LP gibt es noch eine ganze Reihe weiterer Problemklassen, die jeweils spezifische Algorithmen zum Lösen des zu Grunde liegenden Gleichungssystems beinhalten. Die lineare Optimierung umfasst die Problemklassen LP und Mixed Integer Linear Programming (MILP). Letztere unterscheidet sich insbesondere durch das Hinzufügen weiterer Restriktionen, beispielsweise müssen einige der Variablen bei der MILP ganzzahlig oder binär sein. Zur Lösung linearer Optimierungsprobleme (LP, MILP) stehen bereits gute Solver zur Verfügung [1], so z. B. der Open Source Solver CBC von COIN-OR [2] oder der kommerzielle Solver Gurobi [3].

3 Oemof

Das Open Source Projekt “open energy modeling framework (oemof)” wurde von Promovierenden des Zentrums für nachhaltige Energiesysteme in Flensburg (ZNES) und des Reiner Lemoine Instituts in Berlin (RLI) 2014 gegründet. Oemof stellt einen pythonbasierten Werkzeugkoffer dar, der Modellierenden einen niederschweligen Zugang zur Energiesystemmodellierung ermöglicht. Neben den oemof-spezifischen Bibliotheken, Paketen und Modulen wird sich auf relevante Python-Bibliotheken bezogen [1], wobei die kollaborative Software-Entwicklung im Fokus steht. Dabei greift oemof auf das Python-basierte Software-Paket Pyomo zu, in welchem die Energiesektoren Wärme, Kälte und Strom sowie die entsprechenden am Markt verfügbaren Technologien, wie z. B. KWK-Anlagen oder Power-to-Gas, modelliert werden [4][5]. Entscheidend ist auch die Einbeziehung von bspw. Elektromobilität, wodurch sich oemof besonders zur Betrachtung von Zusammenhängen und Abhängigkeiten über alle Energiesektoren eignet, die zur Darstellung von sektorgekoppelten Energiesystemen nötig sind [1].

3.1 Energiesysteme in solph

Die bekannteste oemof-Bibliothek ist “oemof-solph”, die für die Erstellung von LP/MILP-Energiesystemmodellen als „Modellgenerator“ verwendet wird [1]. Mit der EnergySystem-Klasse in solph wird das gesamte Energiesystem (ES) definiert, in das die benötigten Komponenten und Busse hinzugefügt und miteinander verbunden werden. Das Energiesystem wird dabei als bipartiter Graph abgebildet, wobei die Komponenten die Knoten und die Energieflüsse zwischen den Komponenten die Kanten des Graphs bilden. Auch wird Zeitachse und Schrittweite im Rahmen der EnergySystem-Klasse definiert [4]. In Abbildung 1 ist ein ES am Beispiel einer Quartiersversorgung dargestellt. Hier sind die solph-Basisklassen Übertragung (Transformer), Quelle (Source), Senke (Sink) und Speicherung (Generic Storage) und deren Zusammenspiel veranschaulicht. Zunächst stellen die Basisklassen grundsätzliche Funktionalitäten zur Verfügung, erst durch die Parametrisierung erhalten die Objekte ihre energietechnische Bedeutung [4].

3.2 Darstellung des Modellierungsprozesses anhand eines Praxisbeispiels

Mit oemof ist es möglich, komplexe ES zu modellieren und hinsichtlich einer definierten Zielgröße zu optimieren. Anhand eines praxisbezogenen Beispiels soll der Modellierungsprozess veranschaulicht werden. Abbildung 1 zeigt schematisch das Energieversorgungssystem eines Quartiers mit Stromerzeugung über Photovoltaik und Kraft-Wärme-Kopplung.

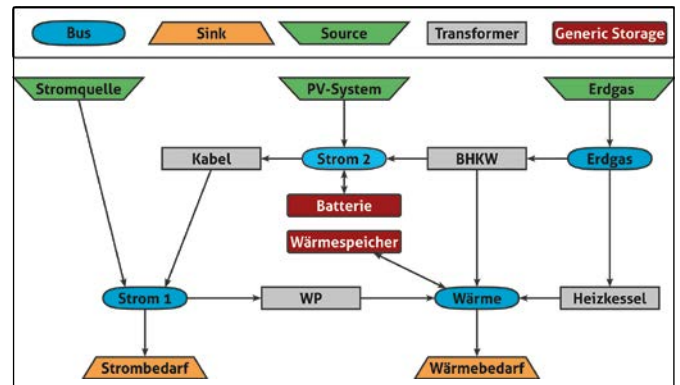


Abbildung 1: Energiesystem schematisch Quartier

Die hierbei verwendeten Komponenten und deren Parameter und energietechnische Bedeutung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Das ES wird hinsichtlich des Betriebskosten- und CO₂-Emissionsoptimums im Betrachtungszeitraum von 72 Stunden modelliert, wobei als Randbedingung u.a. ein zeitvariabler CO₂-Emissionsfaktor für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz vorgegeben wird.

Tabelle 1: Annahmen für die im ES verwendeten Komponenten und Busse

Bezeichnung	Eigenschaft	Parameter/Annahmen
Stromquelle (Source)	Strombezug (Netz)	Zeitvariabler Emissionsfaktor der Nettostromerzeugung (EF_{Strom}) Bezugspreis: 24 Ct/kWh
Erdgas (Source)	Erdgasbezug (Netz)	Emissionsfaktor Erdgas (c): 0,247 kg/kWh (KEA-BW) Bezugspreis: 9 Ct/kWh
PV-System (Source)	Stromproduktion aus PV-Anlage	Installierte Leistung: 600 kWp norm. Lastgang
Strombedarf (Sink)	Strombedarf Quartier	Bedarfslastgang
Wärmebedarf (Sink)	Wärmebedarf Quartier	Bedarfslastgang

Bezeichnung	Eigenschaft	Parameter/Annahmen
BHKW (Transformer)	KWK-Anlage zur Strom- und Wärmeproduktion (Erdgas)	FWL: 362 kW η_{el} : 0,367; η_{th} : 0,55
WP (Transformer)	Wärmepumpe	Heizleistung: 80 kW COP: 4
Heizkessel (Transformer)	Wärmebereitstellung (Erdgas)	FWL: 761 η_{th} : 0,92
Kabel (Transformer)	Transport el. Energie	Verlustfrei
Batterie (Generic Storage)	Batteriespeicher	Speicherkapazität: 500 kWh
Wärmespeicher (Generic Storage)	Wärmespeicher	Speicherkapazität: 300 kWh
Strom_1 (Bus)	Sammelschiene el. Energie	
Strom_2 (Bus)	Sammelschiene el. Energie	
Wärme (Bus)	Sammelschiene Wärme	
Erdgas (Bus)	Sammelschiene Erdgas	

In Abbildung 2 wird der Stromnetzbezug bzgl. „Strom 1“-Bus (vgl. Abbildung 1) für die emissions- (EO) und kostenoptimierte (KO) Simulation veranschaulicht. In Abhängigkeit vom Emissionsfaktor für die Nettostromerzeugung EF_{Strom} wird bei der Kostenoptimierung im Betrachtungszeitraum kein Strom aus dem Netz bezogen, da dies die kostenintensivste Strombereitstellung bedeuten würde. Hingegen wird bei der Emissionsoptimierung zeitweise Strom aus dem Netz bezogen, wenn dieser mit einem geringen CO_2 -Emissionsfaktor zur Verfügung steht.

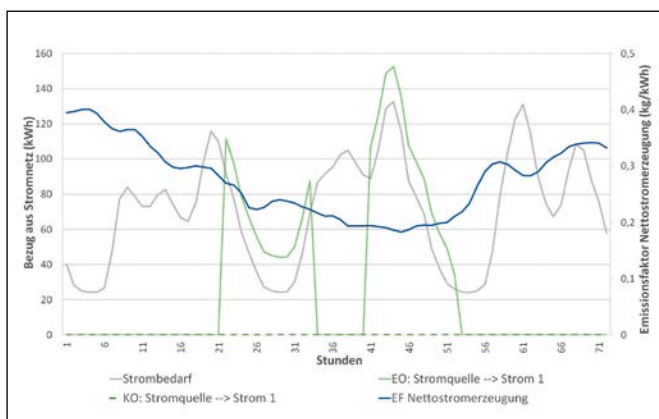


Abbildung 2: Strombezug aus dem Netz bei der kostenoptimierten (KO) und emissionsoptimierten (EO) Betriebsweise. EO: Stromquelle 1->Strom 1 (grün, durchgezogen) zeigt den Netzbezug für die emissionsoptimierte Fahrweise bei niedrigem EF_{Strom} , KO: Stromquelle 1->Strom 1 (grün, gestrichelt) zeigt den Netzstrombezug bei kostenoptimierter Betrachtung

In Abbildung 3 werden die Stromproduktion aus dem BHKW und der Füllstand des el. Speichers in Abhängigkeit vom EF_{Strom} bezogen auf den „Strom 2“-Bus (vgl. Abbildung 1) veranschaulicht. Bei kostenoptimierter Betrachtung wird der el. Speicher in unserem Modell in regelmäßigen Abständen, unabhängig vom EF_{Strom} , beladen und das BHKW öfter betrieben, da hierüber die Strombereitstellung zeitweise kostengünstiger dargestellt werden kann. Bei der Emissionsoptimierung wirken sich hingegen niedrige Werte für EF_{Strom} ausschlaggebend aus. Der Batteriespeicher wird optimiert beladen und das BHKW aufgrund des emissionsintensiveren Erdgases kaum betrieben. Insbesondere, wenn der Strombezug aus dem öffentlichen Netz unter die Marke $EF_{Strom} = 0,20$ kg/kWh fällt (vgl. dagegen $EF_{Gas} = 0,247$ kg CO_2e /kWh), wird die Kapazität des Speichers voll ausgenutzt.

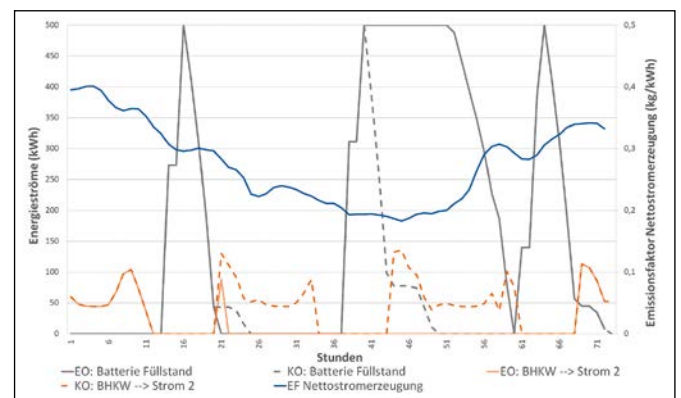


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen EF_{Strom} (dunkelblau) und dem emissionsoptimierten (EO) BHKW-Betrieb (blau, gepunktet) und der Batteriespeicher-Befüllung (grau, durchgezogen) im Unterschied zur kostenoptimierten (KO) Betrachtung (gestrichelt)

3.3 Ausblick

Der EF_{Strom} wird sich mit dem steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Stromnetz stetig verringern, während sich fossile Kraftstoffe aufgrund der steigenden Preise für CO_2 -Emissionen verteuern werden. Genau hier setzt die zukünftige Entwicklung beim Einsatz von BHKW an. Einerseits lohnt sich die Verwendung von Kraftstoffen mit niedrigen oder keinen Emissionen (bspw. Wasserstoff, Biogas u.a.), aber auch die besondere Erzeugungsflexibilität von BHKW tritt weiter in den Fokus. So können sog. Dunkelflauten überbrückt und BHKW verstärkt dann eingesetzt werden, wenn zu wenig Strom aus den fluktuierenden Stromquellen wie Sonne und Wind bereitgestellt wird. Diese komplexe Dynamik in zukünftigen Energiesystemen kann nur mit digitaler Unterstützung betrachtet werden.

4 Top Energy

Das Institut für Energietechnik IfE GmbH an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (IfE) nutzt neben der dargestellten Open-Source-Software „oemof“ u.a. die kommerzielle Software „TOP-Energy“ für die Berechnung komplexer Energiesysteme.

Der Vorteil hierbei liegt in der offenen und benutzerfreundlichen Struktur des Programms. Einerseits kann auf über 200 vorhandene Komponenten aus den Sektoren Strom, Wärme, Kälte, Dampf, Druckluft und Mobilität zugegriffen werden und andererseits bietet die Software entsprechende Schnittstellen für die Erstellung eigener Komponenten.

Im Vergleich zu oemof wird hier das Energiesystem durch eine grafische Oberfläche aufgebaut, wie in Abbildung 4 dargestellt. Durch einfaches Drag-and-Drop können die Komponenten verbunden und somit alle notwendigen Abhängigkeiten hinsichtlich der Energie- und Stoffflüsse modelliert werden. Schwierig bei der Modellierung werden für die Praxis relevante Rahmenbedingungen, welche sich teilweise durch Gesetze oder Förderungen ergeben.

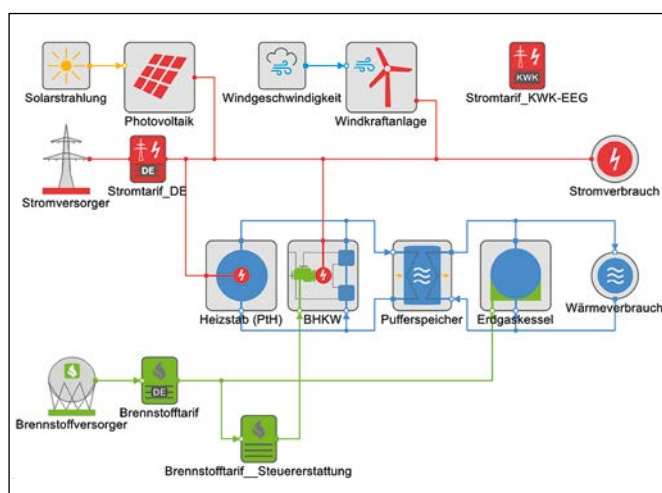


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines modellierten Energiesystems in TOP Energy

4.1 Analyse der Energieversorgung von zukünftigen Quartieren

Derzeit werden viele Projekte im Bereich der Areal- und Quartiersversorgung am IfE bearbeitet, da sich hier für Investoren und Kommunen die Rahmenbedingungen beim Neubau hinsichtlich Energieeffizienz, Anteile erneuerbare Energien und effizienter Wohnraumnutzung stetig ändern.

Bei diesen Projekten steht häufig die Planung eines neuen Quartiers für das Wohnen und Arbeiten noch ganz am Anfang, und es werden zu Beginn mögliche Energieversorgungsvarianten gemeinsam mit dem Auftraggeber diskutiert. Anschließend werden mehrere unterschiedliche Varianten aus techno-ökonomischen und ökologischen Kriterien passend zu den individuellen Anforderungen des Investors, der Kommune sowie der Gegebenheiten vor Ort definiert.

Diese verschiedenen Varianten werden anschließend mithilfe der Optimierungssoftware „TOP-Energy“ modelliert, simuliert und optimiert. Anschließend können die Ergebnisse der Berechnungen optisch aufbereitet werden und

die Abhängigkeiten hinsichtlich der Ökonomie und Ökologie so dargestellt werden, dass hieraus die Entscheidungsgrundlage für wirtschaftliche und/oder politische Entscheidungen entstehen kann.

4.2 Forschungsprojekt „Zukunftsfähige Wärmenetze 2050“

Das IfE startete zum 01.01.2021 das Forschungsprojekt „Zukunftsfähige Wärmenetze 2050“, welches durch das bayerische Wirtschaftsministerium gefördert wird. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Transformationsplanung für bestehende historisch gewachsene, heterogene Wärmenetze technologieneutral zu analysieren und einen Leitfaden zu entwickeln, mit welchem neben den beteiligten Wärmenetzbetreibern auch Weitere den Umbau für eine treibhausgasneutrale leitungsgebundene Wärmeversorgung umsetzen können.

Aufgrund der komplexen Struktur des Energiesystems von bestehenden Wärmenetzen hinsichtlich energetischer und hydraulischer Einflüsse ist es auch hier notwendig, die Berechnung mithilfe geeigneter Software durchzuführen. Hierfür wird u. a. auch die Software TOP-Energy eingesetzt, um die Transformation der Energiesysteme mit allen notwendigen Abhängigkeiten über mehrere Dekaden bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045 zu simulieren.

5 Zusammenführung Praxis und Forschung und Ausblick

Die dargestellte mathematische Optimierung bietet die Möglichkeit komplexe Systeme mit zahlreichen Rahmenbedingungen innerhalb einer vertretbaren Zeit zu berechnen. Mithilfe leistungsstarker Solver können auch große Modelle in wenigen Stunden gelöst werden. Der quelloffene Ansatz in oemof ermöglicht die Nachvollziehbarkeit und eigene Plausibilisierung von Ergebnissen in der Forschung; die grafische Oberfläche in TOP Energy stellt das schnelle Modellieren und Parametrieren in den Fokus und bietet somit einen niederschweligen Einstieg ohne Programmierkenntnisse in TOP Energy. Am Ende der Simulation und Optimierung beginnt jedoch stets die Frage, wie die ermittelten Ergebnisse in die Praxis überführt werden können.

Hier werden zwei unterschiedliche Ansätze je nach Anwendungsfall unterschieden. Einerseits kann aus der mathematischen Optimierung unter der Berücksichtigung aller relevanten Einflussgrößen ein Fahrplan aller möglichen Energieerzeuger abgeleitet werden, welcher direkt in die Leitwarte überführt werden kann. Dabei ist jedoch in der Regel immer die Überprüfung durch einen Mitarbeiter vor Ort notwendig und somit nur für große Energiesysteme mit eigener Leitwarte und Betriebspersonal umsetzbar.

Für kleinere Energiesysteme, welche kein ständiges Betriebspersonal vor Ort haben, muss diese Optimierung möglichst automatisiert ablaufen können. Hierzu ist eine Betriebsstrategie als Grundlage für die spätere Steuer- und Regelungsstrategie zu entwerfen, welche mit klaren Vorgaben (If, Else, ...) dem mathematischen Ergebnis möglichst nahekommt, um die maximale Effizienz zu erreichen. Einige Softwaretools bieten dabei die Möglichkeit, dass innerhalb der Modellierung diese Betriebsstrategie implementiert werden kann. Somit wird durch jede feste Vorgabe der Freiheitsgrad für die Optimierung eingeschränkt. Am Ende dieses Vorgangs dient die beste Betriebsstrategie anschließend als Grundlage für die praktische Umsetzung des Energiesystems.

Referenzen:

- [1] Nagel, Janet (2019): Optimization of Energy Supply Systems. Cham: Springer International Publishing (69)
- [2] COIN-OR: CBC. Online verfügbar unter <https://projects.coin-or.org/Cbc>, zuletzt geprüft am 13.09.2021
- [3] Gurobi Optimization: Gurobi Optimizer.
Online verfügbar unter <https://www.gurobi.com/products/gurobi-optimizer/>, zuletzt geprüft am 13.09.2021
- [4] Krien, Uwe (2020): Erweiterung der Bewertungskriterien von regionalen Strom-Wärme-Modellen durch die Kopplung mit einem überregionalen Modell: Eine freie Python Toolbox. Promotionsschrift. TU Berlin, Berlin
- [5] oemof developer group: Open Energy Modeling Framework.
Online verfügbar unter <https://oemof.readthedocs.io/en/latest/>, zuletzt geprüft am 08.07.2021

Fördergeber des Kompetenzzentrums für Kraft-Wärme-Kopplung:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Laura Weber, M.Eng.

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

la.weber@oth-aw.de



Patrick Dirr, M.Eng.

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

p.dirr@oth-aw.de



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



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

Testscenarien zur Evaluierung autonomer Fahrzeuge

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

KI-ASIC

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) werden weitere Schritte unternommen, leistungsfähigere und zugleich energieeffizientere Methoden der Sensordatenverarbeitung mithilfe gepulster neuronaler Netze für das Automatisierte Fahren zu entwickeln.

Gefördert wird das Projekt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 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 Projektpartnern an der Entwicklung neuromorpher Mikroprozessoren und gepulster neuronaler Netze. Die Signalflusskette 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 evaluiert und validiert 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 Federal Ministry of Education and Research (BMBF) 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 project partners on the development of neuromorphic microprocessors and spiking neural networks. The signal flow chain is modelled on the human brain and should enable an increase in computing power while simultaneously reducing power consumption. The research results are to be tested in real traffic on the basis of defined driving scenarios using an experimental vehicle.

1 Einleitung

Hinter dem Begriff der Künstlichen Intelligenz (KI) steckt eine weit zurückreichende Entwicklungsgeschichte. Bereits 1956 waren führende Wissenschaftler der Meinung, dass Intelligenz auch außerhalb des menschlichen Gehirns geschaffen werden könne. In den darauffolgenden Jahren konnten Fortschritte auf dem Gebiet der Künstlichen Neuronalen Netze erzielt werden, jedoch waren die Möglichkeiten aufgrund der begrenzten Rechenleistung der damaligen Computer sehr eingeschränkt. Erst mit leistungsfähigeren Rechnern und dem Beginn des Zeitalters des Maschinellen Lernens im Jahr 2010, bei dem gezielt Algorithmen für bestimmte, abgegrenzte Problemstellungen entwickelt werden, gelang der Durchbruch im Bereich der KI-Forschung.

Auch in der Industrie findet KI immer mehr Einzug – so auch bei der Entwicklung automatisierter Fahrzeuge. Hierbei wird der Bereich um das Fahrzeug mit verschiedenen Sensoren erfasst und die große Menge an Sensordaten mithilfe von KI-Algorithmen ausgewertet [1].

Die Zahl benötigter Umfelderkennungssensoren wird in automatisierten Fahrzeugen ab Autonomiestufe 3 deutlich ansteigen [2]. Mit den bislang üblichen Verfahrenswegen 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 signifikanten 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 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.

Dieses Potenzial zu zeigen, ist Gegenstand des Forschungsprojektes „*Künstliche Intelligenz – Application-Specific Integrated Circuit*“ (KI-ASIC), das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 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.

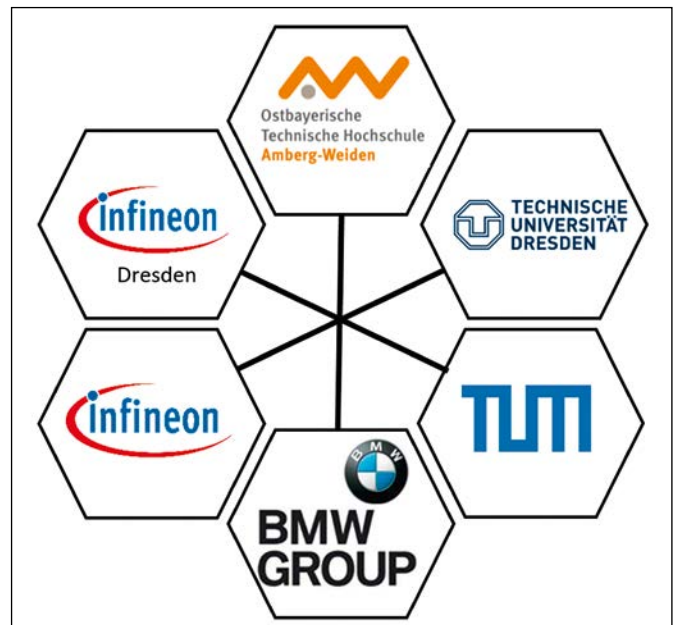


Abbildung 1: Übersicht der Projektpartner

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 in ein hochautomatisiertes Fahrzeug übertragen werden. Der Fokus liegt dabei auf KI-Methoden für Mustererkennung und -analyse mithilfe von Radarsensorik 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 Testszenerarien zu extrahieren. Die OTH AW konzentriert sich bei der Auswahl der Fahrsczenarien auf Testfälle, in denen bereits heutige Radartechnik als primäre Sensoreinheit eingesetzt wird. Der Fokus liegt dabei auf innerstädtischen Testszenerarien, da hier eine zuverlässige und präzise Detektion bzw. Klassifikation aller sich bewegenden Objekte von essentieller Bedeutung ist, um mögliche Kollisionen frühzeitig zu erkennen und beteiligte Verkehrsteilnehmer nicht zu gefährden.

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

Für die Versuchsdurchführung wird ein von BMW mit notwendigen Sensoren und Systemen ausgestattetes Testfahrzeug zur Verfügung gestellt, mit dem die definierten Fahrsczenarien aufgezeichnet werden sollen. Hierbei ist eine Teststrategie mit geeigneten Testszenerarien für die Datenerfassung mit dem Versuchsträger auszuarbeiten. Diese müssen möglichst detailliert beschrieben und erläutert werden, da die einzelnen Szenarien später mehrfach mit einer möglichst hohen Wiederholgenauigkeit durchgeführt werden sollen. Dies ist wichtig, um die gesammelten Radardaten bei unterschiedlichen Witterungs- und Lichtverhältnissen miteinander vergleichen zu können. Besonders für aufeinander aufbauende Testfälle ist eine hohe Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten, damit eindeutige Aussagen über den veränderten Erkennungsradius der Radarsensoren getroffen werden können. Um diese Anforderung an die Szenarien zu realisieren, werden die wichtigsten Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Bremspunkt und Startposition des Test-

fahrzeugs, durch Simulationen detailliert beschrieben und berechnet.

3 Entwicklung und Durchführung einer Teststrategie für die Erstellung von anforderungsbasierten Testdatensets

Um die definierten Testszenerarien in der Realität durchführen zu können, muss ein geeignetes Testgelände zur Verfügung stehen. Hierbei müssen neben den benötigten Streckenlängen auch wichtige Sicherheitsaspekte mit betrachtet werden. So ist es erforderlich, dass das Testgelände nicht Teil des öffentlichen Straßenverkehrs ist, da ansonsten während der Versuchsdurchführung Unbeteiligte gefährdet werden könnten. Unter Berücksichtigung der in MATLAB simulierten Versuchslängen der verschiedenen Fahrsczenarien wurde der in Abbildung 2 dargestellte Flugplatz in Schmidgaden ausgewählt. Die vorhandene Kreuzung ist durch rote Markierungen gekennzeichnet. Die blauen Streifen stellen hier eine mögliche Position des Fußgängerüberwegs dar. Zusätzlich besteht im späteren Projektverlauf die Möglichkeit, an der Stelle des roten Punktes einen Kreisverkehr mit weiteren Testszenerarien zu integrieren.

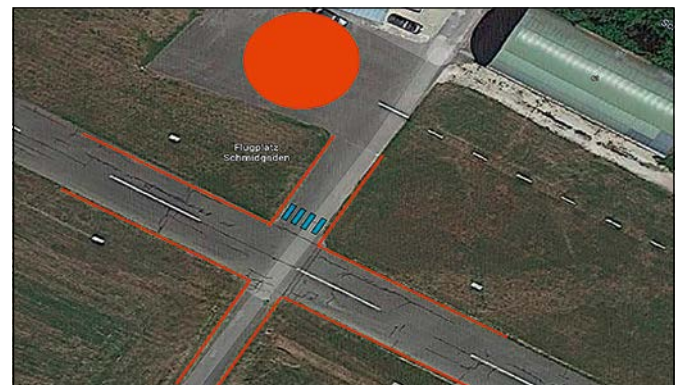


Abbildung 2: Flugplatz Schmidgaden mit möglichen Markierungen [6]

Für die Datenerfassung mit dem Versuchsfahrzeug werden die verschiedenen Euro NCAP-Szenarien als Grundlage verwendet und angepasst. Der Schwerpunkt der Tests liegt hierbei jedoch nicht auf der Kollisionsvermeidung durch das Fahrzeug, sondern in der Erfassung kritischer Situationen. Die Testszenerarien werden deshalb so aufgebaut, dass eine Kollision zwischen Testfahrzeug und den anderen Verkehrsteilnehmern vermieden wird. An der OTH AW wurde deshalb ein Katalog erarbeitet, in dem alle definierten Testfälle gesammelt dargestellt werden.

Im Folgenden soll ein beispielhaftes Fahrsczenario näher erläutert werden. In der in Abbildung 3 dargestellten Testsituation überquert der Fußgänger eine Fahrbahn, in die das Testfahrzeug gerade nach rechts einbiegen will. Der Fußgänger überquert den Zebrastreifen, bleibt in der Fahrbahnmitte des linken Fahrstreifens stehen und lässt das Testfahrzeug vor sich den Zebrastreifen passieren.

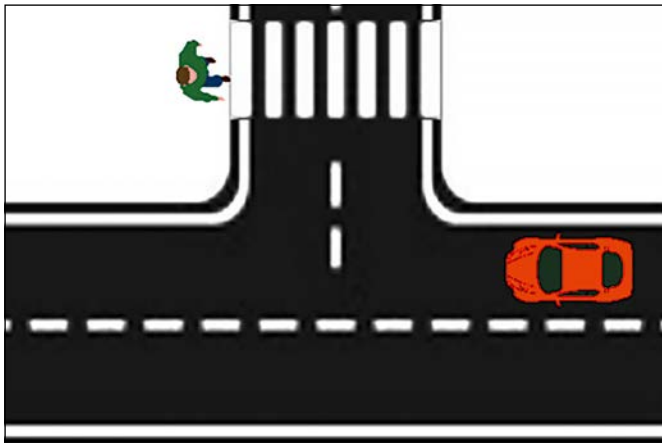


Abbildung 3: Beispiel Testszenario

Damit die Simulationen als Referenz für die späteren realen Versuche verwendet werden können, muss der Aufbau der Straßen des Flugplatzes nachgestellt werden. Die Simulationen im *Driving Scenario Design* von MATLAB stellen eine Abbildung in 2D dar und sollen den Versuchsablauf am Testgelände genau definieren.

In diesen Simulationen werden Start- und Endpositionen der Verkehrsteilnehmer sowie weitere relevante Merkmale, wie beispielsweise Bremspunkte, berechnet. Anhand dieser genauen Beschreibungen der einzelnen Simulationsergebnisse können später die realen Versuche aufgebaut und durchgeführt werden.

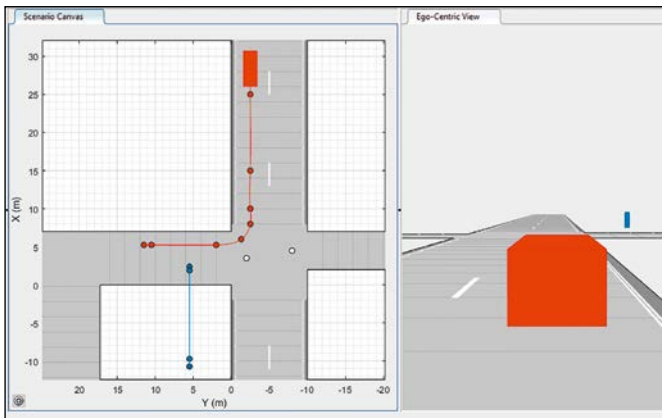


Abbildung 4: Prinzipielle Versuchsdurchführung des beispielhaften Testszenarios

Der simulierte Versuchsablauf des beispielhaften Testszenarios aus Abbildung 3 wird in Abbildung 4 dargestellt. Die Wegpunkte und der Streckenverlauf des Testfahrzeugs sind in roter Farbe ausgeführt. Die Trajektorie des Fußgängers sowie dessen Wegpunkte sind in blauer Farbe markiert.

Aus der Simulation des definierten Testszenarios lassen sich in einem nächsten Schritt somit alle relevanten Informationen ableiten, die für die reproduzierbare Durchführung relevant sind. Neben einer 2D-Darstellung des Fahrerszenarios besteht des Weiteren die Möglichkeit, dieses in einer 3D-Umgebung simuliert ablaufen zu lassen.

Zur Kontrolle der Wiederholgenauigkeit einzelner Szenarien müssen zusätzlich zu den Sensordaten des Testfahrzeugs auch die für die Testauswertung relevanten Daten der am Szenario beteiligten Verkehrsteilnehmer erfasst werden. Hierbei handelt es sich vor allem um die relativen Positionen im Vergleich zum Testfahrzeug und die Bewegungsgeschwindigkeit. Durch die Verwendung von Kameras kann das Szenario von einem beliebigen Standort aus zusätzlich mit aufgezeichnet werden. Infolge der anschließenden Auswertung der Kamerabilder können später die Positionen der verschiedenen Fahrzeuge und übrigen Verkehrsteilnehmer eruiert werden.

Um einen besseren Überblick zu erhalten, wird neben einer Kamera in Bodennähe zusätzlich das Testszenario durch eine Drohne aus der Luft mit aufgezeichnet. Dadurch ist es später möglich, die Geschwindigkeiten der einzelnen Verkehrsteilnehmer anhand der zurückgelegten Strecken zwischen den Bildern zu berechnen.

Für die Durchführung der Testszenarien mit dem Versuchsfahrzeug wurde eine eigene Dokumentation entwickelt, die einen Überblick über die einzelnen Fahrsituationen bietet und diese jeweils in Stichpunkten beschreibt. Ebenso lassen sich die vor Testausführung notwendigen Bautätigkeiten entnehmen. Die Dokumentation dient als Ablaufplan und beinhaltet alle relevanten Rahmenbedingungen, damit eine möglichst einwandfreie Reproduzierbarkeit sichergestellt werden kann.



Abbildung 5: Dummies auf Seilzugplattform [7]

Zur weiteren Optimierung der Wiederholgenauigkeit wird aktuell über den Einsatz eines oder mehrerer Dummies (siehe Abbildung 5) diskutiert. Diese bieten die Möglichkeit, je nach ausgewähltem Testszenario den Bewegungsablauf der Fußgänger bzw. Fahrradfahrer mit den Positionen des Fahrzeugs zu synchronisieren. Die Bewegung des Dummies erfolgt dabei meist über ein Seilzugsystem oder eine selbstfahrende Plattform, deren Steuerung mit einem festen Bewegungsprofil beaufschlagt werden kann.

4 Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung einer Teststrategie für die Erstellung von anforderungsbasierten Testdatensets wurden insgesamt 61 Testszenarien erarbeitet. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit des beschriebenen Testgeländes wird zusammen mit den Projektpartnern eine Auswahl an durchführenden Fahrsituationen getroffen, die unter Berücksichtigung der geforderten Reproduzierbarkeit bei unterschiedlichen Wetterverhältnissen durchgeführt werden. Die aufgezeichneten Daten werden unter Anwendung einer an der OTH AW entwickelten Softwaremethodik ausgewertet, mithilfe derer ein annotierter Datensatz für das Trainieren gepulster neuronaler Netze generiert werden kann. Dieser Algorithmus umfasst neben der Trainingsdatenerzeugung die Datenvorverarbeitung und -annotation und wird unter Einbeziehung der definierten Testszenarien evaluiert.

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 06.10.2021].
- [4] R. Gessler, Entwicklung Eingebetteter Systeme, Ravensburg: Springer Vieweg, 2014.
- [5] Bundesministerium für Bildung und Forschung, „KI-ASIC KI-Prozessorarchitekturen für Radarmodule im autonomen Fahrzeug“, 2019. [Online]. Available: <https://www.elektronikforschung.de/projekte/ki-asic>. [Zugriff am 06.10.2021].
- [6] Google Maps, „Flugplatz Schmidgaden, 92224 Amberg“, [Online]. Available: <https://www.google.de/maps>. [Zugriff am 07.10.2021].
- [7] AB Dynamics, „Soft Pedestrian Target“, [Online]. Available: <https://www.abdynamics.com/de/products/track-testing/adas-targets/soft-pedestrian-target>. [Zugriff am 08.10.2021].

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



Katharina Stein, M.Eng.

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

k.stein@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

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

AUTBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum

Zusammenfassung

Vor einem Jahr startete das Projekt AUTBUS, welches sich die Verbesserung des Mobilitätsangebots im ländlichen Raum zum Ziel setzt. Im letzten Forschungsbericht [1] wurde das Projekt kurz beschrieben. Infolge der geringen Verfügbarkeit öffentlicher Verkehrsmittel sind viele auf ein eigenes Fahrzeug angewiesen, um die alltäglichen Aktivitäten in angemessener Zeit erledigen zu können. Besonders ältere Menschen und solche, die sich kein Fahrzeug leisten können, haben es schwer. Im Sinne gleichwertiger Lebensverhältnisse im städtischen und ländlichen Bereich soll durch das Projekt AUTBUS mittels eines automatisiert fahrenden, flexibel nutz- und buchbaren Kleinbusses eine Verbesserung der Situation erreicht werden. Zum Nachweis der Machbarkeit dieses Vorhabens wird zunächst ein Demonstrator-Fahrzeug entwickelt, welches in Neubäu am See, einem Ortsteil von Roding, eingesetzt und getestet werden soll. Die OTH Amberg-Weiden kooperiert in diesem Projekt mit den Rodinger Verkehrsbetrieben sowie der Firma AVL Software and Functions GmbH. Dieser Bericht fasst die im ersten Projektjahr erzielten Fortschritte zusammen. Hierbei liegt der Fokus hauptsächlich auf der Kommunikation des Buses sowohl zur Infrastruktur als auch zur Buchungs-App. Dies ist eine der Hauptaufgaben der OTH Amberg-Weiden innerhalb des Projekts.

Abstract

A year ago, the AUTBUS project was launched to improve mobility in rural areas. In the last OTH AW research report [1], we provided an introduction to the project. Mobility offers in rural areas are significantly lower than in urban areas. In consequence most people own a vehicle to be able to handle their daily activities in a reasonable time. For those, who cannot afford or cannot drive a vehicle, we seek to improve the situation by offering the use of an automated minibus. The vehicle can be flexibly booked via an app and used for dedicated routes in rural areas. For concept validation, a demonstrator is now being developed, which will be used and tested in Neubäu am See, a district of Roding in Bavaria. The OTH Amberg-Weiden is closely collaborating with the Roding public transport company and AVL Software and Functions GmbH in Regensburg. This report is intended to summarize the progress during the first project year. The focus is mainly on the communication between the bus and the infrastructure as well as to the booking app. Mobile communication is one of the main tasks of OTH Amberg-Weiden.

Projektbeschreibung

Neueste Studien zeigen, dass die Landflucht in den Industrieländern wie Deutschland ein anhaltender Trend ist, der auch in naher Zukunft nicht aufzuhalten zu sein scheint [2]. Gründe dafür sind zum einen die Veränderungen im Arbeitsfeld der Bürger, zum anderen verlassen die Menschen den ländlichen Raum auch wegen der schlech-

ten oder schwer erreichbaren Infrastruktur. Die spärliche Verteilung von Einkaufsmöglichkeiten, Ärzten, Apotheken und anderen öffentlichen Einrichtungen in Kombination mit einem wenig ausgebauten öffentlichen Nahverkehr macht es fast unmöglich dort ohne Auto zu leben. Dies ist auch der Grund, warum viele ältere Menschen in eine Stadt ziehen müssen. Um dieser beschriebenen Abwanderung aktiv entgegenzuwirken, könnte ein neues

Mobilitätsangebot im ländlichen Raum dazu beitragen, das Leben dort wieder attraktiver zu machen. Dieser neue Weg würde durch einen automatisierten Rufbus repräsentiert werden, wie er in AUTOBUS entwickelt wird. Der Bus soll zunächst eine feste Route abfahren. Später könnte der flexibel buchbare Bus als Taxi fungieren, indem er eine neue, vom Benutzer festgelegte Route fährt. Dies würde eine kostengünstige Abdeckung des ländlichen Raums ermöglichen und somit die Lebensqualität dort auch ohne eigenes Verkehrsmittel steigern. [1, 3, 4]

Fahrzeug

Im letzten Forschungsbericht [1] wurden Visionen für die Projektrealisierung mittels eines Kleinbusses skizziert. Dem folgten eine Reihe von Projektentscheidungen und konkreten Implementierungen. Verwendet wird ein elektrisch angetriebener VW-Bus (siehe Abbildung 1), welcher von Fa. Schaeffler Paravan entsprechend der Projektbedürfnisse bereits größtenteils umgebaut ist. Im letzten Forschungsbericht wurde die Verwendung einer Roof-Top-Box mit umfassender Sensorik erläutert, welche nun ebenfalls verbaut ist. Mithilfe dieser Roof-Top-Box, ergänzt um seitlich am Fahrzeug montierte Radarsensoren, lässt sich der gewünschte Automatisierungsgrad 4 nach Definition gemäß SAE J3016 erreichen.



Abbildung 1: Für AUTOBUS umgebaute VW Kleinbus, ausgestattet mit Roof-Top-Box. Die Schachbrettmuster dienen der Kalibrierung der Kamerasensoren der Roof-Top-Box. (Quelle: AVL Software and Functions GmbH)

Infrastruktur

Zu Beginn des Projekts wurde eine breite Palette an möglichen Infrastrukturmaßnahmen betrachtet. Diese bezog Geschwindigkeitsbeschränkungen, Ampelanlagen und zusätzliche Sensorstationen ein. Mit Hinblick sowohl auf die Akzeptanz in der Bevölkerung als auch auf den zu erwartenden finanziellen Aufwand bei einem Einsatz in einem größeren Gebiet, fiel die Entscheidung auf die Road-Side-Units (RSU). Diese bieten den großen Vorteil, nicht aktiv in den üblichen Verkehrsfluss einzugreifen und flexibel an die notwendigen Anforderungen vor Ort angepasst werden zu können. Im ländlichen Bereich spielt außerdem die Energieversorgung eine nicht un-

erhebliche Rolle. In einer ersten Realisierung ist geplant, die RSUs zunächst mit Akkus zu betreiben, die regelmäßig aufgeladen werden. Für mögliche Folgeprojekte ist die Konzeptionierung als autarkes System mittels Photovoltaik vorgesehen. Die prinzipielle Architektur der RSUs sieht eine funktionale Gliederung in Sensor, Verarbeitungseinheit und Kommunikationsmodul vor. Im Rahmen des Forschungsprojekts wird der Radarsensor ARS 408-21 von Continental verwendet. Dieses Gerät wurde nach einem Vergleich unterschiedlicher Sensoren ausgewählt, da die auf dem Bus verbaute Sensorplattform bereits mit performanten Lidarsensoren und Kameras ausgestattet ist und so die Radartechnologie das Spektrum gut ergänzt. Als Kommunikationsmodul kommt das Gerät waveBEE road der Firma Nordsys zum Einsatz. Dieses Modul ist mit ausreichend Ressourcen für die erforderliche Datenverarbeitung ausgestattet. Tests zur Validierung der zeitgleichen Übernahme sowohl der Kommunikation als auch der Datenverarbeitung sind in Entwicklung. Die gewählte Kommunikationstechnologie der waveBEE repräsentiert das speziell für den Einsatz im Straßenverkehr entwickelte pWLAN nach dem Standard ITS-G5, welches im Abschnitt Vehicle-to-Infrastructure (V2I) näher erläutert wird.

Abgesehen von der Definition des Aufbaus und der Funktion der Infrastruktur war ein wichtiger Schritt die Feststellung von geeigneten Positionen für die RSUs. Hierfür musste zunächst der Bedarf analysiert werden, was mit einer Simulation realisiert wurde, welcher zwei Richtlinien als Basis zugrunde liegen. Die Simulationsergebnisse zeigten die prinzipielle Notwendigkeit für erweiterte Sensorreichweiten für automatisierte Fahrzeuge im ländlichen Bereich [5]. Mithilfe eines Testaufbaus des Radarsensors wurden an den beiden Kreuzungen auf der Strecke in Neubäu am See Messungen zur Detektorreichweite für unterschiedliche Verkehrsteilnehmer (LKW, PKW, Radfahrer und Fußgänger) durchgeführt. Abgesehen von der ausreichenden Sensorleistung am Standort wurden noch eine einfache Montage und die Möglichkeit der Energieversorgung in die Entscheidung mit einbezogen. In Absprache mit den örtlichen Behörden und den Projektpartnern wurden zwei Positionen für RSUs festgelegt, eine innerorts für eine Anwendung zum zügigeren Abbiegen und eine weitere außerorts am Bahnhof, die eine sicherheitsrelevante Funktion übernimmt.

Vehicle-to-Network (V2N)

Der Bereich „Vehicle-to-Network“, welcher die Kommunikation des Busses mit einem Server abdeckt, ist für die Weiterleitung von Daten zur Buchungssapp zuständig. Hierbei soll es dem Nutzer ermöglicht werden, mittels App auf dem Smartphone den Bus zu ordern. Hierfür ist eine bidirektionale Verbindung notwendig, über welche das Senden und Empfangen von Daten erfolgt. Diese sind zum einen Statusinformationen des Busses, wie die Posi-

tion, welche durch ein im Fahrzeug verbautes, hoch genaues inertiales Navigationssystem (INS) ermittelt wird, sowie Mitteilungen über die Verfügbarkeit des Systems. Zum anderen werden auch die Buchungsinformationen bezüglich Route, Fahrgäste und anderen Buchungsdetails sowie „Stand-by“- und „Wake-up“-Signale übermittelt. Für diesen Anwendungsfall wurden zunächst die Anforderungen an eine solche Kommunikation ermittelt sowie Technologien hierfür untersucht. Eine grobe Abschätzung wie in [3] und [4] zeigt, dass für die Übertragung genannter Daten etwa einen Nettodatendurchsatz von 27 B/s benötigt wird. Da einmal je Sekunde ein Update erfolgen soll, sollte eine Latenz inklusive deren Varianz von ebenfalls einer Sekunde nicht überschritten werden, damit die korrekte Reihenfolge von übermittelten Paketen gewährleistet ist.

Für die Entscheidungsfindung bezüglich der Übertragungstechnologie, die im Projekt verwendet werden soll, wurde eine Bedarfsanalyse durchgeführt. Diese führte auf eine Übertragung der Daten mittels Mobilfunk. Auch Beispiele anderer bereits bestehender Forschungsprojekte im Bereich automatisiert fahrender Fahrzeuge bestätigten die Vorteile des Einsatzes von Mobilfunk zwischen Fahrzeug und Server. Im Projekt AUTOBUS wird deswegen Mobilfunk der vierten Generation (Long Term Evolution LTE) eingesetzt (und je nach Ausbau der fünften Generation auf 5G umgestellt). Mit der Nutzung von LTE geht zwangsläufig die Nutzung des LTE-Stacks einher, wodurch sich zusätzliche Headerdaten ergeben, welche sich auf 97 Bytes pro übertragenem Datenpaket belaufen und daher mit bedacht werden müssen.

Für die Schnittstelle der Übertragung wurde ein Konzept aus Robot Operating System (ROS), einem Framework für Robotersysteme und Amazon Web Services Internet of Things (AWS IoT), einem IoT-Dienst, erarbeitet, in welchem die Kommunikation via Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) stattfindet. Dies ist zum jetzigen Zeitpunkt als Labordemonstrator für Testfahrten ausgearbeitet. ROS wird hierbei für die Kommunikation hin zum Bus verwendet, AWS IoT dagegen wird für das Senden und Empfangen der Daten zur App hin genutzt. Realisiert werden soll dies auf der auch für die Kommunikation mit der Infrastruktur eingesetzten und im Bus verbauten waveBEE plus Einheit, in welcher ein LTE-Modem verbaut ist. Über ein verteiltes ROS-System kommuniziert diese Einheit mit dem Fahrzeugrechner des Kleinbusses. Das Konzept dieser Schnittstelle wurde bereits in einem Laboraufbau getestet und soll nun in die interne Kommunikationsstruktur des Busses integriert werden.

Messungen der Netzwerkqualität entlang der Teststrecke

Für eine Überprüfung der im vorherigen Abschnitt genannten Anforderungen wurde die Netzwerkqualität

entlang der ausgewählten Teststrecke gemessen, auf welcher später der Demonstrator automatisiert fahren soll. Diese Teststrecke – zu sehen in Abbildung 2 – befindet sich in Neubäu am See im Landkreis Roding, umfasst 1,3 km, unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche von 30 km/h – 80 km/h sowie zwei Kreuzungen. Es wurden insgesamt an drei Testtagen mit unterschiedlichen Wetterbedingungen Messdaten aufgenommen, welche anschließend in der freien Geoinformationssystemsoftware QGIS ausgewertet wurden. Die Auswertung der in [3] und [4] dokumentierten Messungen ergab, dass aufgrund der geringen Anforderung des Bruttodatendurchsatzes über die Teststrecken dieser sicher erfüllt wird. Dies gilt sowohl für die Verbindungsqualität, für den Durchsatz als auch für die Latenz. Die Messungen erfolgten mit zwei Providern (Vodafone und Telekom). Im betrachteten Gebiet wurden mit Vodafone bessere Ergebnisse erzielt, weswegen dieser Anbieter für den weiteren Projektverlauf ausgewählt wurde.

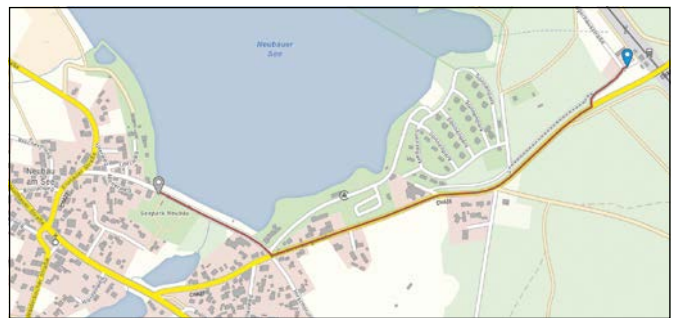


Abbildung 2: Überblick über die Teststrecke. Der Startpunkt auf der linken Seite ist der „Seepark Neubäu“ und das Ziel der Bahnhof in der oberen rechten Ecke. Quelle: Bayernatlas

Vehicle-to-Infrastructure (V2I)

In diesem Abschnitt wird näher auf den ITS-G5-Standard eingegangen. Diese Kommunikationstechnologie bildet die Grundlage für die Übertragung der von den RSUs erfassten Sensordaten zum automatisierten Bus. Hierbei wird das in Abbildung 4 gezeigte Schichtenmodell zugrundegelegt. Die unterste Schicht ist entsprechend dem Standard IEEE 802.11p implementiert und übernimmt die Aufgaben der physikalischen Übertragung und der Datensicherung. In der nächsten Ebene kommt das so genannte Geonetworking zum Einsatz, welches zum Verteilen der Nachrichten die geografische Position als Grundlage verwendet. Die nächsthöhere Schicht ist der so genannte Facility Layer, der mit der Bereitstellung von standardisierten Nachrichten einen reibungslosen Datenaustausch zwischen Stationen im Netz ermöglicht.

An dieser Stelle setzt im Projekt die Nutzung von Collective Perception Messages (CPM) an. Dieser Nachrichtentyp ist speziell darauf ausgelegt Informationen zu erfassten Objekten, die für die Trajektorienplanung relevant sein können, mit anderen Verkehrsteilnehmern zu teilen. Dazu enthalten die Nachrichten Datenfelder zu der sendenden

Station, den vorhandenen Sensoren, den detektierten Objekten sowie freien Flächen. Die einzelnen Container beinhalten wiederum Angaben zur Position, Ausrichtung, Größe, Geschwindigkeit, Klassifizierung und der Zeit seit der letzten Übertragung des entsprechenden Datensatzes. [6]

Als letzte Schicht folgt die Anwendungsschicht, die die Daten für die Implementierung der tatsächlich benötigten Funktionalität verwendet. Diese Anwendung stellt im Rahmen des Projekts das automatisierte Fahren des Busses dar und wird nicht in den RSUs, sondern im Fahrzeug implementiert.

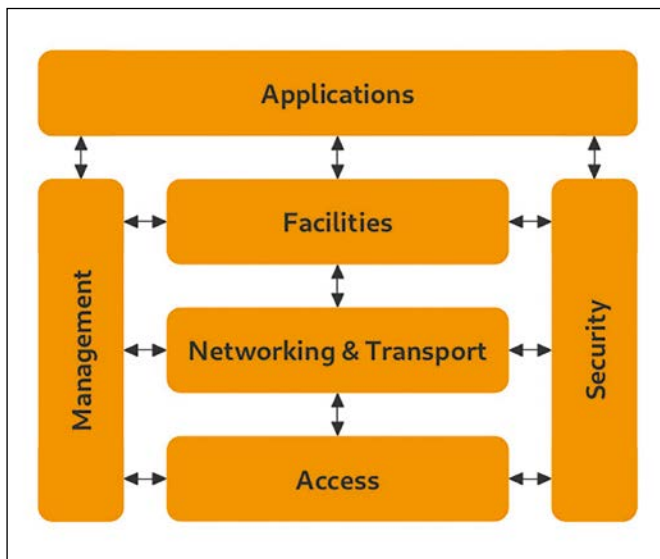


Abbildung 3: Schichtenmodell des ITS-G5-Standards [7]

Ausblick

Die Konzeptionierung der einzelnen Komponenten (Bus, V2N und V2I) des Gesamtsystems ist abgeschlossen, erste prototypische Lösungen liegen vor. Somit kann im nächsten Schritt die Erprobung von Teilfunktionen folgen. Basierend auf den Erkenntnissen aus diesen Integrationstests werden in einer Feedbackschleife die verwendeten Module weiter entwickelt bis der volle Funktionsumfang im Rahmen eines Testbetriebes der Öffentlichkeit vorgestellt werden kann. Anschließend wird der Probebetrieb starten. 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.

Referenzen:

- [1] F. Zeitler, R. Babl, J. Schmid, A. Höß, „AUTOBUS – Entwicklung eines autonomen Kleinbusses für den ländlichen Raum“, in Forschungsbericht 2021, Amberg, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2020
- [2] F. Rösel, T. Weishaupt, „Städte quellen über, das Land dünnt sich aus: Anteil der Landbevölkerung auf niedrigstem Stand seit 1871“, ifo Dresden berichtet, 2020
- [3] R. Babl, „Analysis of the requirements for the communication between an automated bus and the providing server needed for a booking app in the rural area“, Applied Research Conference, Amberg, Bayern, Deutschland, 2021
- [4] R. Babl, J. Schmid, A. Höß, „Analysis and evaluation of the communication requirements for remote operating an automated bus in rural areas“, 24th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Indianapolis, IN, United States, 2021
- [5] F. Zeitler, „Analysis of the required sensor range for an automated bus operating in rural areas based on a simulation“, Applied Research Conference, Amberg, Bayern, Deutschland, 2021
- [6] 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
- [7] Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture, ETSI EN 302 636-3 V1.1.2, 2014

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// DIKo233/02) im Teilbereich Informations- und Kommunikationstechnologin gefördert.

Gefördert durch



Bayerisches Staatsministerium für
Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie

Kontakt:



Roman Babl, B.Eng.

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

r.babl@oth-aw.de



Fabian Zeitler, B.Eng.

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

f.zeitler@oth-aw.de



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



Josef Schmid, M.Sc.

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

j.schmid@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

PRYSTINE – Programmierbare Systeme für Intelligenz in Automobilen

Josef Schmid, M.Sc.
Christian Reil, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

Zusammenfassung

Eine zuverlässige Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und seiner Umgebung ist ein wichtiger Aspekt, um automatisierte Fahrfunktionen zu ermöglichen, die Daten von außerhalb des Fahrzeugs einbeziehen. Die Verwendung mehrerer Datenverbindungen zusammen mit der Vorhersage ihrer Qualität stellt hierfür einen geeigneten Ansatz dar. Im Projekt PRYSTINE entwickelt die OTH AW ein Verfahren zur Laufzeitvorhersage für TCP-Verbindungen über LTE. Es umfasst Datenaufzeichnung, Datenvorbereitung, Merkmalsauswahl, Modelltraining und -bewertung sowie die Integration des Modells auf dem Zielgerät. Zusätzlich zu den technischen Hintergründen und den erforderlichen Schritten für den Einsatz eines Modells auf einer embedded-Plattform im Fahrzeug werden weitere Einsatzmöglichkeiten einer solchen Plattform aufgezeigt.

Abstract

Reliable communication between the vehicle and its environment is an essential aspect to enable automated driving functions that use data from outside the vehicle. One way to achieve this is the use of multiple data connections together with the prediction of their quality of service. In the PRYSTINE project, OTH AW is developing a round trip time prediction method for TCP connections over LTE. It includes data recording, data preprocessing, feature selection, model training and evaluation, as well as the integration of the model on the target device. In addition to the technical background and the necessary steps for the deployment of a model on an embedded platform inside the vehicle, the further application possibilities of such a platform are also indicated.

Projektbeschreibung und Aufgaben der OTH Amberg-Weiden

Für das sichere automatisierte Fahren in Städten und auf Landstraßen ist eine ausfallsichere Umfelderkennung eines Fahrzeugs wesentlich. Ziel von PRYSTINE ist deswegen die Realisierung einer 360°-Umfeldwahrnehmung, welche mittels einer leistungsfähigen FUSION-Plattform umgesetzt werden soll. FUSION steht für “Fail-operational Urban Surround perceptIOn” [1]. Diese Plattform fusioniert die Informationen der Fahrzeugsensoren mit den Daten der hochgenauen digitalen Karte und den Informationen, die über Kommunikation ins Fahrzeug gelangen [2]. Somit wird Performanz, Zuverlässigkeit sowie Betriebssicherheit erreicht und die Voraussetzungen für die Entwicklung des hoch- und vollautomatisierten Fahrens werden geschaffen. Jedoch müssen hierfür teils umfangreiche Daten, wie etwa dynamische Updates der präzisen

digitalen Karte, sicher, zuverlässig und schnell in das Fahrzeug übertragen werden. Hierfür wird Mobilfunk eingesetzt. Da jedoch eine aktuelle, hochgenaue digitale Karte eine Grundvoraussetzung für die autonome Navigation ist, muss die Mobilfunkverbindung möglichst hohe Datenraten bei möglichst geringen Latenzzeiten aufweisen. Der Beitrag der OTH Amberg-Weiden in PRYSTINE betrifft diese ausfallsicherere Kommunikation mittels Mobilfunks.

Gerade in ländlichen Regionen ist die Abdeckung mit Mobilfunk nicht immer gewährleistet und es kann zu Funklöchern zwischen den Mobilfunkmasten kommen. Um diese zu vermeiden und die Verbindungsqualität der Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und einem Server zu erhöhen, entwickelt die OTH AW im Projekt PRYSTINE ein auf KI-Methoden basierendes Verfahren zur Prädiktion der zukünftigen Latenz einer Mobilfunk-

verbindung. Im Projekt PRYSTINE wird dieses Verfahren verwendet, indem eine Hardware mit zwei Mobilfunkverbindungen unterschiedlicher Provider eingesetzt wird, welche je nach Prädiktion die Daten über die eine oder die andere Verbindung kommuniziert. Ziel dabei ist es, die „Rundenzeit“ zwischen Senden einer Anfrage und Empfang der Antwort (Round-Trip-Time) möglichst unter 400 ms zu halten. Nachdem das KI-Modell hierzu erstellt wurde, muss es auf eine embedded-Plattform integriert werden. Die hierbei entstehenden Herausforderungen werden im Folgenden näher betrachtet.

Pipeline zu Round-Trip-Time (RTT) Vorhersage

Zur Vorhersage von Netzqualitätsparametern wie RTT und zum Vergleich verschiedener Algorithmen wird in dieser Arbeit ein Prozess eingeführt, der alle notwendigen Schritte in einer sogenannten Pipeline enthält. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die notwendigen Arbeitsschritte sowie einen Hinweis darauf, wo diese ausgeführt werden. Während einige Aufgaben direkt auf der Zielplattform berechnet werden, werden andere rechenintensive Teile der Pipeline offline auf einer Workstation oder einem Server verarbeitet, um die benötigte Rechenleistung zu gewährleisten. Die Pipeline beginnt mit der Erfassung der relevanten Daten, gefolgt von der Offline-Verarbeitung zum Trainieren eines Vorhersagemodells mit hoher Genauigkeit. Dieses Modell wird an die Anforderungen der Zielplattform angepasst, wo es während der Laufzeit ausgeführt wird. Jeder Verarbeitungsschritt wird in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

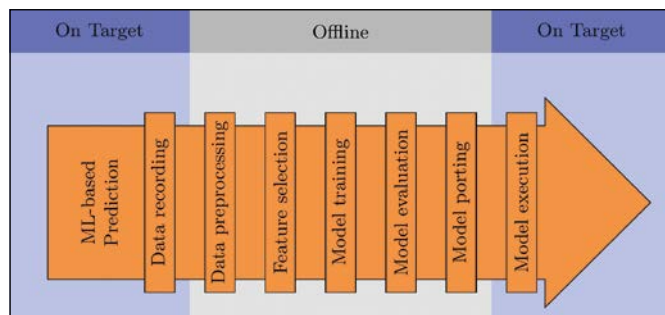


Abbildung 1: Übersicht der Verarbeitungsschritte in der Pipeline

Datenerfassung

Für die Optimierung von Algorithmen und die Erkennung von Merkmalen ist es von Vorteil, wenn möglichst viele Sensordaten zur Verfügung stehen. Eingebettete Geräte haben jedoch Beschränkungen, vor allem in Bezug auf Speicher und Rechenleistung. Beim Sammeln von Daten auf entfernten Geräten bedeuten die Kosten der Datenübertragung eine zusätzliche Einschränkung. Des Weiteren haben Sensordaten die Eigenschaft stark in der Häufigkeit ihres Auftretens zu variieren. Standortdaten werden beispielsweise mehrmals pro Sekunde aktualisiert, während z. B. die Nummer des Mobilfunkmastes

sich erst nach mehreren Sekunden oder sogar Minuten ändert. Traditionell wird ein festes Datenformat erstellt und optimiert, um den Overhead für eine Messung zu begrenzen. Die Aufzeichnung der Ausgaben aller Sensoren führt jedoch oft zu einem Überschuss an Daten pro Messung, da sich viele Messwerte nicht ändern. Zu diesem Zweck wird ein spezielles Protokoll namens LTANS verwendet, das die Komprimierung von Daten entlang einer Zeitreihe ermöglicht. Das Protokoll ermöglicht die dynamische Aufzeichnung von Sensorwerten mit variabler Frequenz und dynamischer Konfiguration. Dies ermöglicht die selektive Aufzeichnung eines beliebigen Sensorwertes, indem nur die Aktualisierung eines Sensorwerts im Verhältnis zur Zeit aufgezeichnet wird.

Datenvorverarbeitung

Zum Training des Vorhersagemodells müssen die aufgezeichneten Daten zunächst vorverarbeitet werden. Dies ist notwendig, um die Anforderungen des maschinellen Lernsystems zu erfüllen. Dabei wird das stark komprimierte Aufzeichnungsformat zunächst in eine CSV-Datei überführt und ungültige Messungen während des Systemstarts werden verworfen. Die Vorhersagewerte werden entsprechend der Vorhersageschrittgröße verschoben und die Aufteilung der Menge in Trainings- und Validierungsdaten schließt diesen Verarbeitungsschritt ab. Dieser Verarbeitungsschritt führt zu zwei Datensätzen, die beide nur gültige Messungen enthalten.

Merkmalsauswahl

Um bessere Vorhersageergebnisse zu erzielen, wird eine Merkmalsauswahl auf dem Trainingsdatensatz durchgeführt. Im Allgemeinen werden Methoden zur Merkmalsauswahl eingesetzt, um relevante Merkmale auszuwählen. Dies reduziert die Dimension des Eingaberaums, den Berechnungsaufwand und die Komplexität des resultierenden Modells. Das Ziel ist es, vernachlässigbare Merkmale wegzulassen, um ein Modell zu erhalten, das schneller zu berechnen ist, ohne gravierende Verschlechterung der Genauigkeit [3].

In einem ersten Schritt der Merkmalsauswahl werden Merkmale mit einer Varianz von weniger als 1 % herausgefiltert [4]. Dabei werden vor allem Merkmale eliminiert, die sich im Datensatz kaum verändern. Auch wenn der Rechenaufwand für diesen Schritt gering ist, erkennt er zuverlässig redundante Merkmale und hilft, ein Übertrainieren des KI-Modells zu vermeiden. Als weitere Methode wird eine Merkmalskorrelation durchgeführt. Durch die Berechnung des Korrelationskoeffizienten für jedes numerische Merkmalspaar werden Merkmale mit einem starken linearen Zusammenhang ermittelt. Ein Beispiel für ein solches Merkmalspaar im Mobilfunknetz ist der Arbitrary Strength Unit (ASU) und der Reference Signal Received Power (RSRP) Wert. Da zwischen ihnen ein linearer

Bezug besteht, ist es somit nicht sinnvoll, beide Merkmale zu betrachten.

Für die weitere Merkmalsauswahl gibt es verschiedene Methoden. Als erste und einfachste Methode wird das Kreuzkorrelationskriterium untersucht. Es berechnet die Korrelation zwischen einem Merkmal und einer Output-Metrik über den gesamten Datensatz. Es drückt die Qualität der linearen Abhängigkeit jeder einzelnen Variablen aus und wird häufig für diese Analyse verwendet [5]. Neben dem Korrelationskriterium kommen weitere Methoden zum Einsatz. Eine davon ist die rekursive Merkmalseliminierung (RFE) [6]. Sie ermöglicht die Identifizierung geeigneter Features durch rekursives Training von linearen maschinellen Lernmodellen. Dabei werden entweder die besten oder die schlechtesten Merkmale für die nächste Trainingsiteration entfernt, bis eine vorgegebene Grenze an Merkmalen erreicht ist. Da RFE mit verschiedenen maschinellen Lernmodellen durchgeführt werden können, können beide, Support Vector Regression (SVR) als auch Decision Tree Regression (DTR), untersucht werden. Die endgültige Merkmalsauswahl berücksichtigt die Ergebnisse der drei vorgestellten Verfahren mittels Mehrheitsentscheid. Die entsprechende Merkmalsselektion wird anschließend auf den Trainings- und Validierungsdatsatz angewendet.

Training und Evaluation des Vorhersagemodells

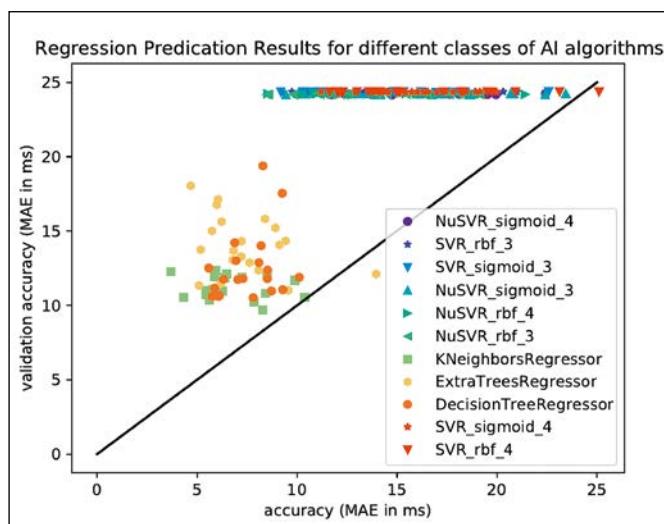


Abbildung 2: Auswertung der Modelle des maschinellen Lernens

Um einen genauen Prädiktor für die Vorhersage zu trainieren, werden verschiedene Algorithmen für maschinelles Lernen unter Verwendung der ausgewählten Eingangsmerkmale bewertet. Hierzu zählen SVRs sowie der Variation Nu-SVR [7] genauso wie k-Neighbors-Regression [8] und DT-basierte maschinelle Lernverfahren [9].

Die trainierten Modelle werden anhand von zwei Datensätzen bewertet. Der erste, der Testdatensatz, wird während einer Aufteilung zwischen Training und Test im Rahmen des Modelltrainings erzeugt. Der zweite, der so

genannte Validierungsdatsatz, enthält andere Daten, die bisher nicht in dem Prozess verwendet wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt. Dieses Streudiagramm zeigt auf der Abszisse den mittleren absoluten Fehler des Modells in Bezug auf den Testdatensatz an, während die Ordinate den für den Validierungsdatsatz erhaltenen Fehler darstellt.

Bei der Auswahl eines geeigneten Modells müssen beide Werte berücksichtigt werden. Insgesamt zeigt die Abbildung, dass die k-Neighbors-Regression und die DT-basierte maschinellen Lernmethoden mit am besten abschneiden. Da DT jedoch einen weitaus geringeren Speicher- und Rechenbedarf haben, wird ein solches Modell für die Portierung ausgewählt.

Modell Portierung und Ausführung

Nachdem ein Modell ausgewählt wurde, muss es auf ein Zielgerät portiert werden. Da es sich dabei um ein eingebettetes Gerät handelt, sollte die Implementierung des Algorithmus so effizient wie möglich sein, so dass möglichst wenig Overhead entsteht. Daher wird ein Programm namens sklearn-porter [10] verwendet, um das Modell in reinen C/C++-Code umzuwandeln, ohne dass zusätzliche externe Bibliotheken benötigt werden. Anschließend kann dieser Programmcode in die Software der Zielplattform integriert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Vorhersage-Pipeline entwickelt, die die Integration eines Vorhersagemodells auf einem Multipath-Gateway ermöglicht. Die Pipeline enthält verschiedene Schritte, die unter anderem Vorverarbeitung, Merkmalsauswahl, Modelltraining, Auswertung und Portierung umfassen.

Neben den Einsatzmöglichkeiten eines solchen Multipath-Gateway im Forschungsprojekt PRYSTINE sind weitere Einsatzgebiete denkbar, z. B. bei unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs). Aufgrund des Einsatzes von UAVs in der Logistik, Transport oder für Such- und Rettungsmissionen [11] ist eine zuverlässige Kommunikation in Beyond Visual Line Of Sight (BVLOS) Betrieb notwendig. Wegen seinen Fähigkeiten bezüglich Abdeckung und der sicheren Datenübertragung wird das Mobilfunknetz auch in diesem Anwendungsfall berücksichtigt [11]. Dazu kann neben dem LTE-Netz auch das 5G-Netz genutzt werden. Im Gegensatz zu Straßenfahrzeugen können sich UAVs auch in unterschiedlichen Höhen bewegen, was einen dritten Freiheitsgrad schafft und somit Datenerfassung, Speicherung und Training des Vorhersagemodells vor zusätzliche Herausforderungen stellt.

Referenzen:

- [1] Belhaj, Salem und Tagina, Moncef. "Modeling and Prediction of the Internet End-to-end Delay using Recurrent Neural Networks." *Journal of Networks*, 2009: 528-535
- [2] Bhoi, Sourav Kumar und Khilar, Pabitra Mohan. "Vehicular communication: a survey." *IET networks*, 2014: 204-217
- [3] Zheng, Alice und Casari, Amanda. *Feature engineering for machine learning: principles and techniques for data scientists*. O'Reilly Media, Inc, 2018
- [4] Schneider, Mathias. *Online and Microservice-based Data Throughput Prediction*. 2018
- [5] Yang, Guang und Lin, Xingqin und Li, Yan und Cui, Hang und Xu, Min und Wu, Dan und Rydén, Henrik und Redhwan, Sakib Bin. *A telecom perspective on the internet of drones: From lte-advanced to 5G*. 2018
- [6] Guyon, Isabelle und Weston, Jason und Barnhill, Stephen und Vapnik, Vladimir. "Gene selection for cancer classification using support vector machines." *Machine learning*, 2002: 389-422
- [7] Schölkopf, Bernhard und Smola, Alex J und Williamson, Robert C und Bartlett, Peter L. "New support vector algorithms." *Neural computation*, 2000: 1207-1245
- [8] Fix, Evelyn, and Joseph Lawson Hodges. "Discriminatory analysis. Nonparametric discrimination: Consistency properties." *International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique* 57.3 (1989): 238-247.
- [9] Tso, Geoffrey and Kelvin Yau. "Predicting electricity energy consumption: A comparison of regression analysis, decision tree and neural networks." *Energy* 32.9 (2007): 1761-1768.
- [10] Morawiec, Darius. "sklearn-porter." 2021. <https://github.com/nok/sklearn-porter>
- [11] Christen, Markus und Guillaume, Michel und Jablonowski, Maximilian und Lenhart, Peter und Moll, Kurt. *Zivile Drohnen – Herausforderungen und Perspektiven*. VDF Hochschulverlag AG, 2018

Fördergeber:

Die Autoren danken der European Union H2020 – ECSEL Joint Undertaking – sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung in beiden Forschungsprojekten: PRYSTINE (Grant agreement No. 783190, funding code 16ESE0330) und ADACORSA (Grant Agreement No. 876019, funding code 16MEE0039).



Kontakt:



Josef Schmid, M.Sc.

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

j.schmid@oth-aw.de



Christian Reil, M.Eng.

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

ch.reil@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

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

a.hoess@oth-aw.de

Zusammenfassung

Die Energiewende treibt politische Blüten. Vor welchen Herausforderungen steht Deutschland? Welche Absichten sind technisch umsetzbar? Welche Qualifikation von Ingenieuren ist künftig gefragt?

Abstract

The energy transition is giving rise to political blossoms. What challenges does Germany face? Which projects are technically feasible? What qualifications of engineers will be in demand in the future?

Einleitung

Energiewende, Wasserstoff, Elektromobilität – die politische Diskussion ereifert sich an Schlagworten, die bereits in den 1980er-Jahren populär waren. Gaspipelines und riesige Tankschiffe sollen Wasserstoff aus den Solarregionen Nordafrikas nach Europa transportieren. Batteriezüge, Brennstoffzellenfahrzeuge und solarbetriebene Flugzeuge vertreiben die altgedienten Verbrennungsmaschinen. Sind die Visionen im beginnenden 21. Jahrhundert endlich realisierbar geworden?

„Seit es die Schulpflicht gibt, vergällen die Pauker den neugierigen Kindern die abenteuerliche Elektrolyse und deren schöne Feuerwerke durch frustiges Theoretisieren. Das Wort Wasserstoff hingegen wird erst bei den Älteren negativ besetzt, durch die drei Assoziationen »Bombe«, »Explosion« und »Zeppelin« [1] mutmaßte „Der Spiegel“ vor Jahrzehnten und würfelte Wasserspaltung, Knallgas und Kernfusion durcheinander. Katalytische Reaktionen und Druckbehälterbau sind jedoch auch in der heutigen Ingenieurausbildung keine selbstverständlichen Inhalte. Über nachhaltige Prozesse und grüne Chemie herrschen willkürliche Vorstellungen – nicht nur in der Politik. Greenwashing und Emissionshandel erwirtschaften heute Gewinne mit den Altlasten der Zukunft. Eine seriöse Diskussion um CO₂-Neutralität darf nicht Rechenricks bedienen, bei denen Emissionen im Ausland verschwinden und die Nachwelt Abgase in unterirdischen Kaver-

nen erbt. Die Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen, Stickstoffoxide bei Verbrennungsprozessen, Ammoniak und Treibhausgase neben CO₂ müssen berücksichtigt werden. Fundierte technische Lösungen tun Not, andernfalls laufen die Versprechungen nach Klimaneutralität ins Utopische.

Mit dem Gelingen der Energiewende steht nicht nur die Innovationskraft der deutschen Wirtschaft auf dem Prüfstand, sondern auch die Lernfähigkeit des überkommenen Bildungssystems mit den traditionell eingeübten Disziplinen. Gegen den Trend zum theoretischen Studium müssen experimentelle Praktika wieder gefördert und stärker gewürdigt werden. Technischer Fortschritt nährt sich nicht aus Meinungen aus sozialen Medien, sondern gedeiht durch Wissen und Können, Fleiß und Ideenreichtum. Forschung, Technikum und Fertigung dürfen nicht getrennte Stationen einer unendlichen Entwicklungsgeschichte sein, die neue Produkte in Diskussionsrunden und Kostenrechnungen ersticken. Unternehmerischen Mut braucht es, um Entwicklungen in die Produktion zu führen und als Innovationen auf den Markt zu bringen.

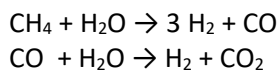
Die frühen Luft- und Raumfahrtprogramme bezeugen beispielhaft, wie eine erfolgreiche Projektzusammenarbeit zwischen Naturwissenschaften, Ingenieuren und Kaufleuten aussieht. Fachlich gemischte Teams brechen die Lethargie des Altbekanntes. Im Technologietransfer zu mittelständischen Firmen, die sich keinen Stab von Experten

aus unterschiedlichen Gebieten leisten können, finden die forschungsstarken Hochschulen eine zukunftsweisende und staatstragende Aufgabe. Auf dem Gebiet der grünen Energien ist ein Experimentalmarkt entstanden.

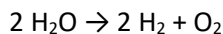
Grüner Wasserstoff

20 % der CO₂-Emissionen in Deutschland (170 Mio. t) erzeugt der Transportsektor, maßgeblich der Individualverkehr. Ob CO₂-Neutralität mit erneuerbarem Strom grundsätzlich machbar ist, hängt von der Antriebsform ab: batterieelektrisch, Brennstoffzellenbetrieben oder mit synthetischen Kraftstoffen aus Elektrolysewasserstoff (E-Fuels).

Wasserstoff heute ist eine fossile Technologie! Wasserstoff wird großtechnisch aus Erdgas oder Kohle in einem zweistufigen Prozess durch katalytische Dampfreformierung hergestellt. Als Nebenprodukt fallen Kohlenstoffoxide an. Die Feinreinigung des Wasserstoffs von Kohlenmonoxid ist unverzichtbar für die Nutzung in Brennstoffzellen.



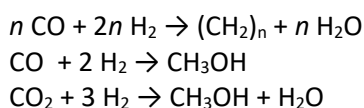
Eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft muss auf die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus Windkraft und Solarenergie setzen. 1 TWh Strom entspricht 20 000 t H₂. Die Wasserzersetzung mit Strom aus Kohle- und Gaskraftwerken ist unsinnig.



Schon heute werden bis zu 5 % Elektrolyse-Wasserstoff ins Erdgasnetz eingespeist, um konventionelle Verbrennungsöfen zu bedienen – freilich noch kostspielig, aber ein zeitnahe Schritt zur Einsparung fossiler Energieträger. Wasserstoff verbrennt in Motoren ohne CO₂-Ausstoß, jedoch wie bei allen Verbrennungen werden Stickstoffoxide emittiert. Nachhaltig ist die „elektrische“ Nutzung von Wasserstoff – in Brennstoffzellen, deren technische Reife und Lebensdauer sich noch erweisen muss.

Synthetische Kraftstoffe

Kein Power-to-X-Kraftstoff ist grundsätzlich CO₂-neutral. Synthesegas – das Gemisch aus H₂ und CO – ist die traditionelle technische Basis für synthetische Kraftstoffe nach dem wenig wirtschaftlichen Fischer-Tropsch-Verfahren. Mit speziellen Katalysatoren entstehen Methanol und Oxymethylenether (OME) aus H₂ und CO₂, die nachhaltig als Elektrolysewasserstoff und aus Prozessabgasen der Stahl- und Baustoffindustrie zur Verfügung stehen.



Ein wenig Chemie muss sein. Denn ein Sauerstoffatom mehr im Molekül bedeutet technische Herausforderungen für Katalysatoren und Reaktionstechnik. Die aufwändig aus Methanol und Formaldehyd zugänglichen Oxymethylenether (OME) H[CH₂O]_nCH₃ (n = 3 bis 5) verbrennen im Dieselmotor nahezu rußfrei. Dimethylcarbonat (CH₃O)₂CO und Methylformiat HCOOCH₃ aus Methanol mit CO₂ bzw. CO eignen sich für Benzinmotoren [2]. Ruß bildet sich im Motor bei niedriger Temperatur, Stickstoffoxide bei hoher Temperatur. Synthetische Kraftstoffe erleichtern NO_x-arm optimierte Verbrennungsmaschinen.

Nachhaltige Antriebskonzepte

Die Well-to-Wheel-Analyse [3] veranschaulicht Energieaufwände und Emissionen verschiedener Antriebskonzepte vom Bohrloch bis zum Rad (Tabelle 1). Für die gleiche Strecke nutzen elektrische und konventionelle Antriebe eine vergleichbare kinetische Energie von 0,16–0,18 kWh/km. Strom- und Kraftstoffverbrauch hingegen haben höchst unterschiedliche Werte und Einheiten. 6,3 L/(100 km) mit den Heizwert von Diesel entsprechen 0,61 kWh/km.

Der Batterieantrieb ist mit 80 % Tank-to-Wheel-Wirkungsgrad und einem Drittel des Well-to-Wheel-Energieaufwands eines Dieselaautos klar im Vorteil, insbesondere im Teillastbetrieb. Verluste treten durch Stromübertragung (5 %), Batterieladen (9 %), Elektromotor und Antrieb (17 %) auf. Die Herstellung von Batteriefahrzeugen fordert wegen der Akkuproduktion mehr Energieaufwand und CO₂-Belastung als ein vergleichbares Benzin- oder Dieselfahrzeug, wenngleich die Automobilbauer mittelfristig verbesserte Zellchemien und deutliche Kostensenkungen erwarten. Allein Sparsamkeit über die Lebensdauer, eine Second-Life-Nutzung und vernünftiges Recycling kompensieren die frühe CO₂-Last des Batterieautos.

Der Vorteil käuflicher Brennstoffzellenfahrzeuge von Toyota und Hyundai liegt beim Wasserstoff (0,010 ... 0,012 kg/km), nicht im Stromverbrauch (0,33 ... 0,40 kWh/km). Bei Brennstoffzellantrieben fallen Platin-Katalysatoren und Carbonfaser-Verbundwerkstoffe für die Wasserstofftanks an. Verluste entstehen in Stromübertragung und Elektrolyse (33 %), Wasserstoffspeicherung und Betankung (21 %), Brennstoffzelle und Elektroantrieb (24 %). Die gesamte CO₂-Bilanz – heute nicht besser als die von Verbrennungsfahrzeugen – wird mittelfristig durch nachhaltige Strom- und Wasserstoffgewinnung günstiger.

Die langfristig zu erwartenden Verbesserungen bei Verbrennungsmotoren sind begrenzt. E-Fuels überzeugen wegen des sechsfachen Energieaufwands gegenüber Batteriefahrzeugen nicht. Auf dem Pfad Strom → Wasserstoff → Kraftstoff treten Verluste für Stromübertragung und Elektrolyse (33 %), Power-to-Liquid-Synthese und Kraftstofftransport (23 %), Verbrennungsmotor und Antrieb (31 %) auf. Am Rad kommen 13 % der

Tabelle 1: Energieaufwand und Treibhausgasausstoß aktueller Antriebskonzepte, nach [3].

Fahrzeugtyp	Batterie	Brennstoffzelle	E-Fuel	Diesel	Benzin
Akronym	BEV	FCEV	E-ICEV	ICV	ICV
Wirkungsgrad in %					
– Well to wheel (gesamt)	69	22	13	23	23
– Tank to wheel	81	48	29	29	29
– Well to tank	86	46	44	79	80
Energieaufwand (kWh/km)	0,23	0,80	1,39	0,77	0,70
– relativ zur Batterie	1	3,5	6,0	3,3	3,0
CO ₂ -Ausstoß (g/km)					
– heute und langfristig	69 ... 1,2	241 ... 4	418 ... 7	211 ... 153	196 ... 143

eingesetzten elektrischen Primärenergie an. Selbst optimistische Zukunftsszenarien mit defossilisiertem Stromsektor sehen Verbrennungsmotoren mit synthetischen Kraftstoffen ungünstig.

Ausblick

In Deutschland sind rund 47 Millionen PKW zugelassen, die über die Lebensdauer 632 Mrd. km zurücklegen. Sollen sämtliche Fahrzeuge durch Batterieautos ausgetauscht werden, werden zusätzlich 28 % · 516,6 TWh = 145 TWh mehr Strom gebraucht – das ist die gesamte Nettostromerzeugung durch Wind- und Wasserkraft des Jahres 2019 [3]. Ausschließlich Brennstoffzellenantriebe forderten plus 98 % (506 TWh), ausschließlich E-Fuel-Antriebe 170 % (878 TWh) mehr. Bis 2030 soll der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auf mindestens 65 % (337 TWh) steigen – das reicht für den Mehrverbrauch durch zehn Millionen Batteriefahrzeuge (31 TWh) oder Brennstoffzellenfahrzeuge (109 TWh), doch für E-Fuels wird die elektrische Energie knapp.

Ein „defossiliertes“ Straßen-, Güter-, Bahn-, Flug-, Schiffs- und öffentlicher Verkehr setzt auf klimafreundlich erzeugten Strom, der aus wind- und sonnenreichen Regionen in Europa, Afrika und im Nahen Osten kommen kann. Wo möglich wird Strom aus ausländischen Kernkraftwerken benötigt. Für den Fern- und Schwerlastverkehr, Land- und Baumaschinen sind alternative Lösungen zu Batterien gesucht. Flugverkehr und Schiffe könnten künftig E-Fuels nutzen, die sich für den Individualverkehr verbieten. Synthetische Brennstoffe werden dauerhaft teurer als direkt genutzter Strom, Erdöl und Erdgas sein. Strombasierte Brennstoffe sind Ergänzung, leider nicht Alternative [4].

Als C₁-Synthesebaustein sind CO₂ und das daraus hergestellte Methanol für die chemische Industrie hochinteressant. Stahlwerke, Raffinerien und Zementwerke werden langfristig CO₂-Emissionen als Rohstoff für chemische und biotechnologische Prozesse nutzen, beispielsweise zur Herstellung von Polymeren, Kosmetik und Proteinen. Technisch ungelöst ist der Kohlenstoffzyklus: grüne Pflanzen beherrschen die mit Sonnenlicht angetriebene CO₂-Rückgewinnung aus der Luft durch Photosynthese. Das abzuschauen, ist Aufgabe der Forschung.

Referenzen:

- [1] H. Halter, Das Undenkbare Denken, Der Spiegel 37/1987, <https://www.spiegel.de/politik/das-undenkbare-denken-a-7f2df12a-0002-0001-0000-000013525271>
- [2] I. Kundler, Synthetische Kraftstoffe: Oxygenat-Verbindungen, Nachrichten aus der Chemie, 2021, 69(9), 41-42.
- [3] D. Priester, I. Krossing, Energiebedarf im Individualverkehr: Elektromobilität und synthetische Kraftstoffe, Nachrichten aus der Chemie, 2021, 69(9), 36-40.
- [4] Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics, Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, Berlin 2018. www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen.

Kontakt:



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Zusammenfassung

Im Industrial Internet of Things sollen alle Komponenten einer Industrieanlage möglichst uneingeschränkt auf das Internet zugreifen und über das Internet kommunizieren können. Dies führt zur Auflösung der bewährten Kommunikationsstruktur und stellt hohe Anforderungen an die Ressourcen der Komponenten. Ein möglicher Lösungsansatz ist die in dieser Arbeit vorgeschlagene Architektur. Die Anlage wird in Zellen unterteilt. Eine Zelle ist dabei eine in sich abgeschlossene Einheit, die eine Funktionalität realisiert. Jede Zelle verfügt durch ein EDGE Gateway über den uneingeschränkten Zugang zum Internet und damit in die Cloud. Um eine möglichst nahtlose Weiterverarbeitung der Informationen in der Cloud zu ermöglichen, werden Informationsmodelle der "OPC UA" Companion Standards verwendet, die dies zumindest prinzipiell ermöglichen.

Im Rahmen der "Small Smart Factory" der Arbeitsgruppe AUT an der OTH AW wurden diese Konzepte exemplarisch umgesetzt und das Konzept verifiziert. Dafür wurden intelligente Sensoren entwickelt, die sowohl echtzeitfähiges Industrial Ethernet als auch Informationsmodell bereitstellen. Ein entsprechendes EDGE Gateway wurde ebenfalls realisiert. Hierbei zeigte sich, dass eine praxisnahe und -relevante Lösung auch hierarchische Strukturen einsetzt und bewusst darauf verzichtet, möglichst viele Komponenten internetfähig zu machen. Weiter zeigte sich, dass nach wie vor anwendungsspezifisches Know-how und eigene Implementierungen nötig sind, um Industrial Internet of Things Funktionalität zu erreichen. Gerade für KMU dürfte dies zurzeit noch eine Hürde für den Einsatz von IIoT-Technologien sein, sodass hier nach wie vor Bedarf für Softwaretools und Komponenten besteht, die einen niederschweligen Zugang ermöglichen.

Abstract

The Industrial Internet of Things requires all components to communicate via the Internet. Therefore, the proven concept of the hierarchical communication architecture becomes more and more obsolete. In parallel, resources of all components have to meet the high requirements of full-blown Internet communication and information model processing. To cover for this, we propose an architecture where we have a decentralised cell-by-cell structure of the plant respectively the shop floor. Each cell is equipped with an edge gateway to provide an unrestricted Internet access. Furthermore, Industrial Ethernet facilitates real-time communication within a cell. Low-end sensors and actors are I/O devices in this PROFINET communication of a cell, while complex intelligent devices not only use PROFINET, but also have their own Internet access and information model processing.

To assess the proposed architecture we built the above-mentioned functionality in our small smart factory. Within this strictly decentralised demonstrator, we implement complex sensors and actors. They have full internet access and information model processing and they use PROFINET for real-time communication within the cell. We attach low-end sensors and actors layer via PROFINET to a programmable logic controller (PLC) in this demonstrator.

From this practical assessment, we see that a solution that is not only relevant for the academic community deliberately employs hierarchical communication structures that will be embedded in entities that allocate the Internet access for them components.

1 Einleitung

In der Fertigung und in der Prozessindustrie hat sich historisch eine strikt hierarchische Kommunikationsstruktur etabliert. Diese als Automatisierungspyramide bezeichnete Struktur gliedert die Kommunikation von einzelnen Sensoren und Aktoren mit der Steuerung bis hin zur unternehmensweiten IT.

Diese Festlegung, welche Komponenten miteinander kommunizieren, wird seit langem punktuell aufgehoben. Insbesondere für Fernwartung und "Troubleshooting" ist es seit gut zehn Jahren üblich, nicht nur Steuerungen per Fernzugriff anzusprechen, sondern auch komplexe Sensoren und Aktoren und somit die strikte Hierarchie zu durchbrechen. Ganz erheblich höhere Anforderungen an Qualität und Quantität dieser Zugriffsmöglichkeiten ergeben sich durch die Industrie 4.0 Paradigmen und die neuen Konzepte für die Steuerung von Produktionsanlagen. Die Integration cyber-physischer Systeme in die Produktion und Logistik soll eine dezentral gesteuerte, flexible Fertigung ermöglichen, bei der das herzustellende Produkt quasi selbstständig die einzelnen Stationen seiner Bearbeitung ansteuert. Ermöglicht werden soll so eine rentable Produktion von Einzelstücken und Kleinstmengen bis hin zu Losgröße 1. Dies ist mit den heute noch meist üblichen zentral gesteuerten Produktionsstraßen, die für eine feste Reihenfolge von Bearbeitungsschritten konzipiert sind, nicht möglich [1]. Für die Industrie 4.0 Kommunikation bedeutet dies, dass alle Komponenten unstrukturiert und wahlfrei miteinander kommunizieren.

2 Technologien für das Industrial Internet of Things "IIoT"

Betrachtet man die Anforderung aus Sicht des Schichtenmodells, so sollen die IP-basierten Netze des Business-IT-Bereichs mit etablierten Applikationen durchgängig mit der Steuerungstechnik verknüpft werden. Die Steuerungstechnik wird in diesem Umfeld meist mit „Operation Technology „OT“ bezeichnet.

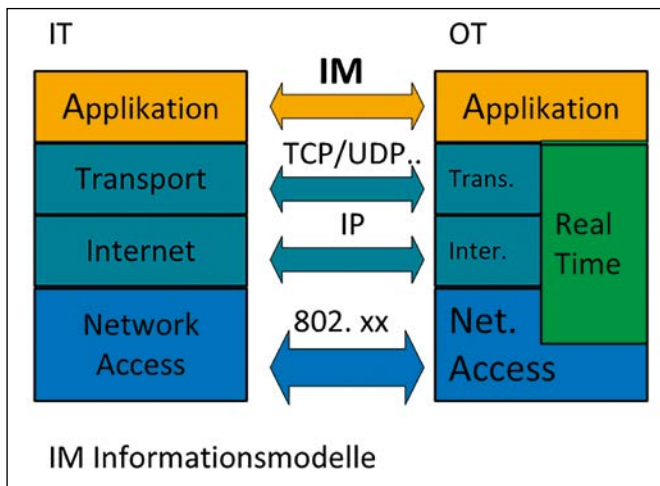


Abbildung 1: I4.0 Kommunikation

In Abbildung 1 ist auf der linken Seite die vereinfachte Darstellung der Kommunikation in der Business-IT dargestellt und auf der rechten Seite der Aufbau in der OT. Da Protokolle wie TCP/IP nicht echtzeitfähig sind, müssen hier zwangsläufig auf der OT-Seite auch andere Mechanismen unterstützt werden, sobald Echtzeitanforderungen erfüllt werden müssen. Die Kommunikation von IT und OT kann sinnvollerweise nur über die Applikation mit kohärenten Informationsmodellen (IM) erfolgen. Dies bedeutet, dass ein Feldgerät in der OT sowohl den Standard-Stack als auch die Echtzeitfähigkeit realisieren und zusätzlich das Informationsmodell bereitstellen muss. Nur wenn die Anwendung keine oder sehr geringe Anforderungen an Antwortzeiten und Echtzeitverhalten stellt, kann auf den Echtzeitpfad verzichtet werden. Allerdings muss das Informationsmodell dennoch unterstützt werden. Künftige Entwicklungen zielen darauf hin, dass mit Standard IT-Repertoire Echtzeitfähigkeit erreicht werden kann. Über Time Sensitive Networking „TSN“ wird Echtzeitfähigkeit und durch „konvergente“ Netze soll eine direkte Netz-Kopplung möglich werden. Zurzeit sind diese Technologien noch nicht so verfügbar, dass sie in einem praxisrelevanten Aufbau eingesetzt werden können. Daher werden sie in den hier vorgestellten Untersuchungen nicht berücksichtigt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Durchgängigkeit der Informationsmodelle für die nahtlose Kommunikation. Da das IIoT-Paradigma den wahlfreien Zugriff aller Geräte auf alle Daten, genauer auf alle Informationen, erfordert, sind Informationsmodelle zwingend erforderlich, die unabhängig von Hersteller-, Betreiber- und Anwendung sind. Sie müssen einheitlich und stringent spezifiziert, standardisiert, getestet und zertifiziert werden, wenn die geforderte Interoperabilität tatsächlich erreicht werden soll. Dies ist aber aktuell nicht der Fall, sodass anwendungsabhängig das tatsächliche Informationsmodell erstellt werden muss.

Von den aktuell zur Verfügung stehenden Technologien eignet sich insbesondere PROFINET als echtes, skalierbares Industrial Ethernet Eco System, mit dem Anforderungen auf der OT-Seite realisiert werden können. Für die Kopplung von OT und IT bietet sich TCP/IP an, da es in PROFINET ebenfalls mit genutzt wird. Als besonderes leichtgewichtiges Protokoll für einen strukturierte Datenaustausch bietet sich MQTT "Message Queuing Telemetry Transport" an, da es ressourcenarm auch auf OT-Komponenten einfach implementiert werden kann. Allerdings sind hier keine Informationsmodelle spezifiziert.

Für den Informationsaustausch werden die Informationsmodelle aus dem OPC UA Umfeld eingesetzt. Neben Basisfeatures und Security-Belangen, sind hier mit den sogenannten Companion Standards Informationsmodelle für einzelne Anwendungsfelder definiert. Hervorzuheben ist hier, dass diese Companion Standards konzeptionell im Widerspruch zur I4.0 Kommunikation stehen, da sie eben nicht anwendungsunabhängig sind.

Weitere Technologien wie 5G und Konvergente Netze, die sich zum Teil noch im Entwicklungsstadium befinden, werden in den hier vorgestellten Arbeiten nicht weiter betrachtet.

3 Lösungsansatz für die effiziente I4.0-Vernetzung

Als Lösungsansatz wurde die strikte Gliederung in Zellen gewählt, die sowohl I4.0-Steuerungs- als auch I4.0-Kommunikationskonzepte realisiert. Jede Zelle ist mit einer industrietauglichen Steuerung ausgestattet, die mit Sensoren und Aktoren über PROFINET kommunizieren kann. Während Low-End-Sensoren und Aktoren zum Teil auch direkt an die Steuerung angeschlossen werden können, weisen die komplexen intelligenten Komponenten jeweils auch einen eigenen Zugang zum Internet auf. Eine zentrale Rolle kommt dem EDGE-Gateway zu, das sowohl im PROFINET eingebunden ist, als auch über OPC UA kommuniziert. Das EDGE-Gateway hat Zugriff auf sämtliche Daten und Informationen. In Abbildung 2 ist diese Architektur schematisch skizziert.

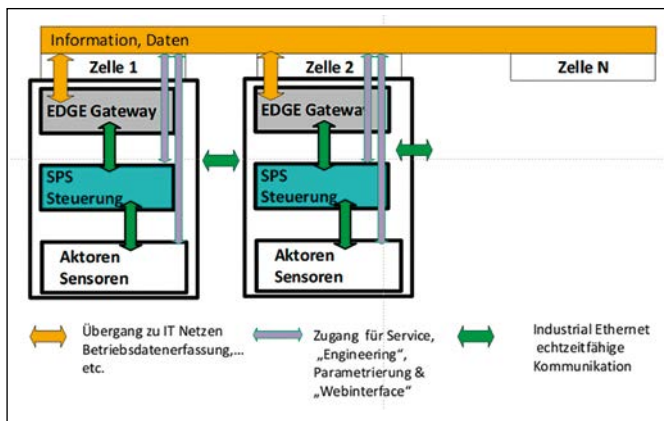


Abbildung 2: Architektur für effiziente I4.0-Vernetzung

4 Steuerungskonzepte für die I4.0-Produktion

Anhand des Small Smart Factory Demonstrators im Labor Anlagentechnik wird ein dezentrales Steuerungskonzept prototypisch implementiert und evaluiert. Der Demonstrator besteht aus 10 mobilen und modular aufgebauten Zellen, die für die Ausführung unterschiedlicher Aufgaben konzipiert sind, sowie aus zwei ebenfalls mobilen, für den kollaborativen Einsatz geeigneten Leichtbaurobotern [2]. Alle Zellen sind in der Lage, Werkstücke mithilfe von Förderbändern zu transportieren. Einige der Zellen besitzen weitere Fähigkeiten, beispielsweise haben sie eine Bildverarbeitungsstation für Qualitätskontrollen der Werkstücke oder ein NFC-Modul, das auf den Werkstücken befindliche NFC-Chips beschreiben kann, integriert. Der modulare Aufbau der Hardware spiegelt sich auch im Aufbau der Steuerungstechnik wieder.

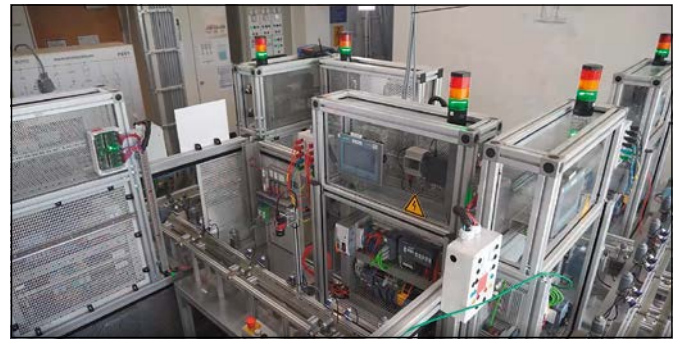


Abbildung 3: Teil der Small Smart Factory Demonstrator Anlage im Labor Anlagentechnik

Das dezentrale Steuerungskonzept sieht vor, dass die einzelnen Produktionseinheiten untereinander kommunizieren müssen, um die Übergabe von Werkstücken zu realisieren. Dies erfolgt über OPC UA. Damit bestimmt ist, welche Zellen Kommunikations-Verbindungen zueinander aufbauen, muss jede Zelle während des Initialisierungszustands der Anlage zunächst ermitteln, zu welchen Zellen sie benachbart ist. Diese Nachbarschaftserkennung wird mithilfe von Barcodes und Barcode-scannern realisiert. Auf dieselbe Weise stellen die Zellen auch fest, ob sich neben ihnen eine Roboterstation befindet und bauen gegebenenfalls eine PROFINET-Verbindung zu dieser auf. Damit die Zellen jeweils das nächste Ziel, beziehungsweise den nächsten Produktionsschritt eines Werkstücks kennen, muss in der Initialisierung einmalig durch eine zentrale Koordinationsstelle die Werkstückroute festgelegt werden. Zu diesem Zweck erhält diese Koordinationsstelle von jeder Zelle über OPC UA einige Informationen. Dazu zählen die Nachbarschaftsverhältnisse der Zellen und die durch die jeweilige Zelle ausführbaren Aufgaben. Um nun die Routen der Werkstück(träger) berechnen zu können, muss nur noch angegeben werden, welche Bearbeitungsschritte vorgenommen werden sollen. Dies kann der Anlagenbetreiber über OPC UA erledigen, gegebenenfalls auch remote. Anhand aller Angaben berechnet die Koordinationsstelle dann die Routen und teilt diese per OPC UA den einzelnen Zellen mit. Ab diesem Zeitpunkt können diese die Werkstücke selbstgesteuert bearbeiten, ohne auf eine zentrale Steuerung angewiesen zu sein.

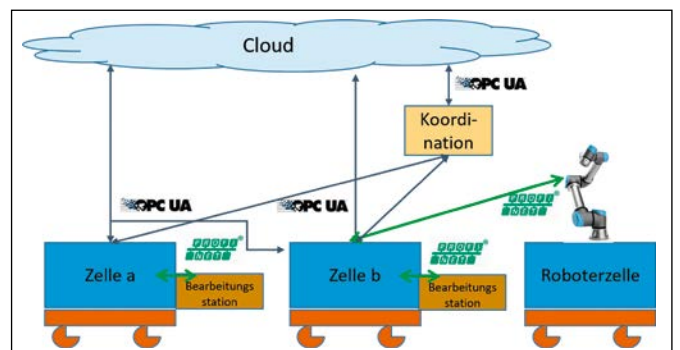


Abbildung 4: Dezentrales Steuerungskonzept

Ein weiteres Steuerungskonzept, das zunehmend an Bedeutung gewinnt, stellt die cloudbasierte Steuerung dar. Hintergrund dieser Entwicklung ist, dass Steuerungstechnik, um die Ziele der Industrie 4.0 zu erfüllen, zunehmend rechenintensiver und weniger statisch wird. Die geforderte Rekonfigurierbarkeit von Anlagen ist mit den bestehenden starren Steuerungssystemen und -architekturen nur schwer umsetzbar. Neue Aufgaben, beispielsweise im Bereich der künstlichen Intelligenz und der Selbstoptimierung von Produktionsanlagen, benötigen große Mengen an Rechenleistung, die jedoch nicht über die gesamte Zeit zur Verfügung stehen muss. Eine skalierbare Lösung hierfür stellen cloudbasierte Steuerungskonzepte dar. Lediglich die Ansteuerung der Sensorik und Aktorik bleibt Aufgabe der lokalen Steuerungsebene [3].

Ein cloudbasiertes Steuerungskonzept wurde ebenfalls anhand des Small Smart Factory Demonstrators prototypisch implementiert. Hierbei wurden die SPSen der Anlage zu reinen IO-Devices degradiert und die Steuerungstechnik auf einen externen Rechner verlagert. Die Kopplung zwischen den beiden Ebenen erfolgte über OPC UA, wie in Abbildung 8 dargestellt wird. Zusätzlich zur Demonstrator-Anlage konnte noch ein digitaler Zwilling der Anlage durch dasselbe Steuerungsprogramm gesteuert werden.

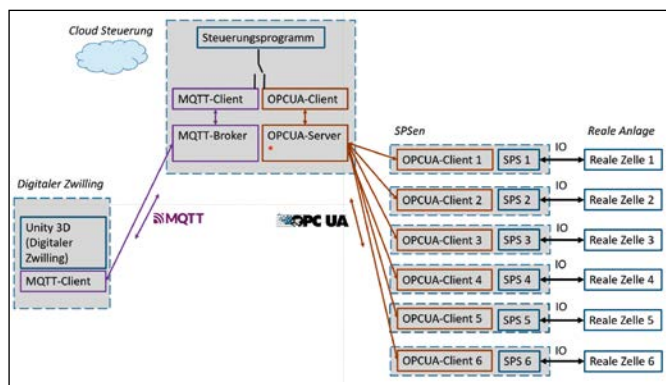


Abbildung 5: Cloudbasiertes Steuerungskonzept

5 Entwicklung smarter Sensoren mit PROFINET und OPC UA

Um die beschriebenen Konzepte zu testen, werden entsprechende intelligente Sensoren und Aktoren benötigt, die so nicht als Produkte zur Verfügung stehen. Daher entwickelt die Arbeitsgruppe AUT unterschiedliche Komponenten, die eine Kommunikation mit den eben genannten Standards ermöglichen und auf Low-Cost-Hardware und Open-Source Software basieren. Diese werden beim Betrieb der Small Smart Factory verwendet. Konkret wurden eine Bildverarbeitungs-Station, ein Barcodescanner-Modul und ein NFC-Modul, das Daten sowohl lesen als auch schreiben kann, entwickelt.

Als Hardware-Plattform wurde dabei jeweils ein Raspberry

Pi Modell 4 mit einem Linux Betriebssystem verwendet, das als Basis für mehrere intelligente Sensoren/Aktoren gleichzeitig dienen kann. In Kombination mit weiterer Hardware wie einer Industriekamera, einem Barcodescanner oder einer NFC-Erweiterungsplatine entsteht die jeweilige Funktionseinheit. Auf dem Raspberry Pi laufen jeweils Anwendungsprogramme, die die Sensor-/Aktor-Funktionen ermöglichen, sowie ein PROFINET Device Stack und ein OPC UA Server. Verwendet wurden für die Implementierung der Kommunikationsschnittstellen ein PROFINET Stack, der freundlicherweise von der Firma Phönix Contact bereitgestellt wurde, sowie die Open-Source Bibliothek open62541, die OPC UA-Kommunikation ermöglicht [4]. PROFINET dient der Kommunikation mit der SPSen, OPC UA hingegen wird für die Vernetzung mit der überlagerten IT verwendet. Im Rahmen der Demonstrator-Anlage werden konkret die Daten der Werkstücke mit einer Datenbank, die sich auf einem externen Rechner befindet, ausgetauscht. Verwendet wird die nicht-relationale Datenbank „MongoDB“ [5]. Beispielsweise werden an der NFC-Station die Daten eines Werkstücks aus der Datenbank über OPC UA abgefragt, und anschließend wird der Datensatz auf den NFC-Chip des Werkstücks geschrieben.

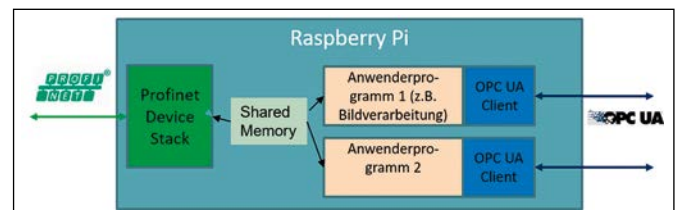


Abbildung 6: Intelligenter Sensor/Aktor



Abbildung 7: Raspberry Pi als Basis für intelligente Sensoren/Aktoren

Für die Implementierung der Software wurden Open-Source-Bibliotheken verwendet. Dabei ist insbesondere die opencv-Bibliothek, die für die Bildverarbeitung verwendet wird, hervorzuheben. Diese besticht durch eine extrem hohe Flexibilität und eine große Nutzer-Community, die im Internet zahlreiche Anwendungsbeispiele und Tutorials zur Verfügung stellt [6]. Im Rahmen der Small Smart Factory wird die Bildverarbeitung beispielsweise dafür genutzt, um im Rahmen einer Qualitätskontrolle Form und Farbe eines Werkstücks zu detektieren. Einen weiteren Anwendungsfall stellt die Nutzung eines Bild-

verarbeitungsprogramms zur Lokalisierung eines Werkstückträgers dar. Die Kamera wird dazu an einem der Leichtbauroboter angebracht. Über PROFINET werden die ermittelten Koordinaten des Werkstückträgers dem Roboter mitgeteilt.

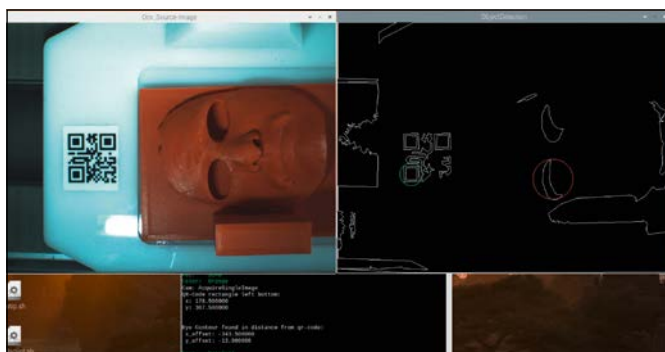


Abbildung 8: Ermittlung von Form und Farbe eines Werkstücks mittels Bildverarbeitung

6 Netzwerk Monitoring für I4.0 mittels PROFINET OPC UA Companion Standard

Es besteht gerade in der I4.0-Kommunikation die Notwendigkeit, den Status des Industrial Ethernet Netzwerks zu überwachen. PROFINET bietet die Möglichkeit Daten über die Geräte für deren weitere Auswertung zu sammeln, um Diagnosen durchzuführen, Wartungspläne zu erstellen oder Antworten über die Verfügbarkeit der Geräte erhalten zu können. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Daten zur Weiterverarbeitung auf einen Server oder in die Cloud übertragen werden sollen. Mit dem 2021 erschienenen PROFINET Companion Standard ist es möglich, solche Daten für PROFINET-Geräte, unabhängig von welchem Hersteller, komfortabel zu verarbeiten.

Für die Implementierung muss der parallele Betrieb von TCP/IP-Kanälen mit Echtzeitkommunikation berücksichtigt werden, daher ist es notwendig, auf einem Gerät sowohl PROFINET-Controller als auch OPC UA-Server mit dem entsprechendem Informationsmodell zu implementieren.

Im Rahmen der Arbeit der AUT-Gruppe wurde ein solches System für verschiedene Kombinationen von Geräteanschlüssen entwickelt. Das Konzept der Arbeit sieht aus wie in Abbildung 9 gezeigt.

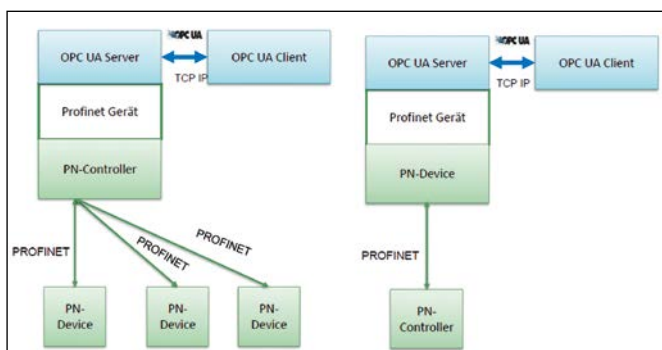


Abbildung 9: PROFINET OPC UA Companion Standard

Ein OPC UA-Server auf einem der PROFINET-Geräte sammelt Informationen über das PROFINET-Netzwerk. Wir verwenden hier exemplarisch als Informationen den Verbindungsstatus der Geräte und ihre IP-Konfiguration. Anhand des Companion-Standards wurde das Informationsmodell implementiert, um die Informationen auf dem Server zu speichern. Somit kann man einen OPC UA-Client verwenden, um Informationen über PROFINET-Geräte im Netzwerk zu erhalten, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

#	Server	Node Id	Display Name	Value	Datatype	Statuscode
1	open62541-based OPC UA Application	NS2 Numeric 1025	DefaultGateway	192.168.0.10	String	Good
2	open62541-based OPC UA Application	NS2 Numeric 1022	IPAddress	192.168.0.10	String	Good
3	open62541-based OPC UA Application	NS2 Numeric 1023	StationName	SiemensSPS	String	Good
4	open62541-based OPC UA Application	NS2 Numeric 1024	SubnetMask	255.255.255.0	String	Good

Abbildung 10: IP-Konfiguration in PROFINET OPC UA Companion Standard

7 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Mit der vorgeschlagenen Architektur und den selbst entwickelten intelligenten Sensoren und Aktoren ist es möglich, dass Komponenten Informationen wahlfrei und sicher austauschen. Bei der Umsetzung wurden zahlreiche technologische Details sichtbar, die weiter untersucht werden müssen.

Hervorzuheben ist, dass sehr große Sorgfalt darauf verwendet werden muss, wie und welche Komponentenstandards eingesetzt werden. Es sind bereits gute Tools verfügbar, um Informationsmodelle direkt für Steuerungen zu erstellen. Sobald jedoch der nahtlose Austausch von Informationen gefordert ist, muss nach wie vor applikationsspezifisch spezifiziert und implementiert werden. Dies reduziert sich zwar meist auf ein Mapping, ist aber jedoch ohne Detail-Know-how nicht möglich.

Für die Anwendung in großen Anlagen in der Großindustrie stellt dies sicher keine Einschränkung dar, wogegen dies für die Nutzung in KMU noch eine sehr hohe Zugangshürde ist.

Danksagung

Teile des Projekts wurden mit Mitteln des Förderprojekts „ISAC“, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, unterstützt. Außerdem danken wir den Firmen SIEMENS AG und Phoenix Contact Electronics für die Bereitstellung von Hard- und Software.

Referenzen:

- [1] H. Kagermann, W. Wahlster und J. Helbig, „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0.“, Berlin, 2013 (Zuletzt aufgerufen am 10.10.2021).
- [2] [Online]. Available: <https://aut-oth.de/> (Zuletzt aufgerufen am 10.10.2021).
- [3] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl und M. ten Hompel, Handbuch Industrie 4.0 Band 1, Berlin: Springer-Vieweg Verlag, 2017 (Zuletzt aufgerufen am 10.10.2021).
- [4] [Online]. Available: <https://open62541.org/> (Zuletzt aufgerufen am 10.10.2021).
- [5] [Online]. Available: <https://www.mongoddb.com/de-de> (Zuletzt aufgerufen am 10.10.2021).
- [6] [Online]. Available: <https://opencv.org/> (Zuletzt aufgerufen am 10.10.2021).

Kontakt:



Oleksandr Volodin, M.Eng.

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

o.volodin@oth-aw.de



Katharina Lutter

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

k.lutter@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



HI-TECH-STANDORT AMBERG

Blaupause für die digitale Fabrik

In Amberg fertigen wir Produkte, Systeme und Software für den Weltmarkt. Mit fast 5.000 Beschäftigten und ca. 200 Auszubildenden sind wir der größte Arbeitgeber in der Region und bieten zukunftsorientierte Arbeitsplätze mit attraktiven betrieblichen Leistungen eines global agierenden Unternehmens. Über 1.000 Ingenieure entwickeln Hi-Tech-Produkte für industrielle Anwendungen, Infrastruktur und Gebäude, darunter führende Automatisierungssysteme wie die SIMATIC- und SIRIUS-Familie. In unserem mehrfach preisgekrönten Standort setzen wir auf modernste IT und Fertigungstechnologie und bilden damit die Blaupause für die digitale Fabrik der Zukunft.

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

SIEMENS

Neuerungen bei Zertifizierung in der Industrieautomatisierung – Von TSN zu Advanced Physical Layer

Benedikt Etzold, M.Sc.
Sebastian Zach, M.Sc.
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 Testlabor erfolgreich geprüft werden, bevor der Hersteller das entsprechende Zertifikat bei der PI erwerben kann. Ein solcher Prüfvorgang besteht aus einer Abfolge genau definierter Testfälle, in denen verschiedenen Funktionen des Geräts untersucht werden. Ein offizielles PROFINET-Zertifikat garantiert damit eine absolut reibungslose Interoperabilität mit anderen PROFINET-Produkten.

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

Abstract

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

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

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

Erweiterungen des Testfelds und andere Herausforderungen

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

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

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

Ein weiteres TRIAL-Bundle wurde für das ProcessAutomation Profile 4.0 veröffentlicht. Da Geräte dieser Kategorie vornehmlich in besonders sensiblen Szenarien verwendet werden, besteht gerade hier gesteigerter Bedarf an Zertifizierungsmechanismen; die entsprechenden Tests werden ebenfalls mit dem Automated RT-Tester durchgeführt.

Als Folge der Automatisierung der PA Profile wurde der ART für die Zertifizierung von APL (Advance Physical Layer) vorbereitet. Die Integration der notwendigen Konverter in das Testsetup und die Unterstützung von 10Mbit/s wurden für den ART entwickelt.

TSN im Zusammenspiel mit den anderen Netzwerkschichten

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

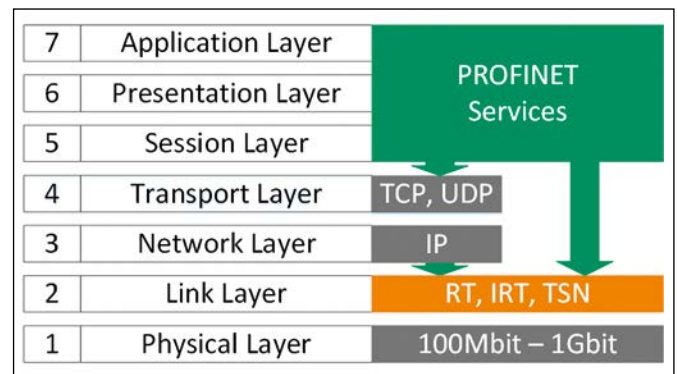


Abbildung 1: PROFINET und TSN im Protokollstack des ISO/OSI-Modells

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

Für den Automated RT-Tester bedeutet diese neue Strategie eine Reihe an tiefgreifenden Änderungen: Neue Testfälle müssen spezifiziert und implementiert werden, um die korrekte Umsetzung verschiedener TSN-Features im Zertifikationsprozess sicherstellen zu können. Die gestiegenen Anforderungen gerade im Bereich der takt-synchronen Kommunikation bedeuten auf lange Sicht zwangsläufig die Abkehr von den bis dato etablierten Standard-Testsetups. In enger Zusammenarbeit mit Siemens wurde daher ein neues Testsetup entworfen, das es zulässt, zeitkritische Prozesse auf eine externe Hardwarekomponente auszulagern.

Integration von Advance Physical Layer (APL)

Bei APL handelt es sich um eine Erweiterung des Physical Layers für single-pair Ethernet (SPE). Diese Technologie basiert auf 10BaseT1L und erlaubt Kabellängen von bis zu 1000m bei 10Mbit/s full-duplex.

Sie wurde entwickelt für den Einsatz in Fahrzeugen, ist aber daher auch für die industrielle Automation, Home Automation und IoT-Anwendungen interessant.

APL basiert auf IEEE und IEC Standards die den Einsatz in gefährlichem Umfeld erlauben. Daher bietet APL Sicherheit durch Kommunikation und Energieversorgung über zwei Leitungen. APL definiert daher verschiedenste Port Profile für unterschiedlichste Leistungspegel mit und ohne Schutz für Gefahrenbereiche. Eine Zweidrahtleitung sorgt bei APL für die Datenübertragung und optional für die Spannungsversorgung eines Gerätes. Mit diesen zwei Drähten lassen sich bei SPE Datenübertragungsraten von 10Mbit/s bis zu 10Gbit/s erreichen, wobei weniger Platz

für Kabel und Anschlussraum gebraucht wird. Dadurch lassen sich Endgeräte, also Sensoren und Aktoren, auf der untersten Feldebene betreiben. APL selbst erweitert den SPE-Standard um die PROFINET-Funktionalität, wie Diagnosemechanismen und schnelle Parametrierung. Dieser Schritt ebnet nun PROFINET den Weg in den Bereich der Prozessautomation für explosionsgeschützte Bereiche.

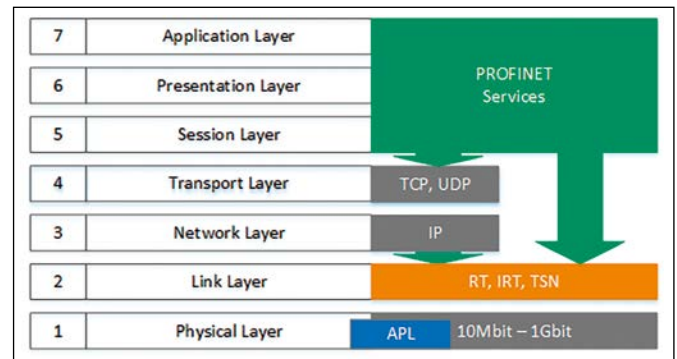


Abbildung 2: APL Integration in PROFINET

Kontakt:



Benedikt Etzold, M.Sc.

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

b.etzold@oth-aw.de



Sebastian Zach, M.Sc.

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

s.zach@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt

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

hp.schmidt@oth-aw.de

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.

Durch eine eigens entwickelte Messhardware, mit komplexer Signalverarbeitung [1] [2] [3] wird die Stabilität der Übertragung bei solchen stör anfälligen Anwendungen untersucht. Es wird das typische Impulsrauschen von Frequenzumrichtern und dessen Einkopplung untersucht. Zusätzlich wurde ein neuer Algorithmus zur Kompensation von Impulsrauschen entwickelt, der die Störungen miniert. Dies ist z. B. bei kostengünstigen Übertragungsmedien, wie Zweidrahtleiter, der Fall. Bei der kombinierten kontaktlosen Energie- und Datenübertragung findet man ähnlich schwierige Bedingungen vor.

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.

An OFDM-based physical Layer is used for analyzing typical disturbances in industrial communication. As first steps there was created an end-to-end simulation of the complete physical layer including FEC, which is realized in hardware on a DSP-system [1] [2] [3]. This experimental platform is used to examine typical disturbances in industrial communications. In addition, an algorithm for mitigation of impulsive noise is proposed.

1 Übertragungsmodell

Die Übertragungsstrecke soll einer realen störbehafteten industriellen Anwendung nachempfunden sein. Es wird zwischen mehreren Kommunikationsmodulen über verschiedene geschirmte und ungeschirmte Datenleitungen kommuniziert, welche parallel zu der Stromversorgung eines Antriebs mit Frequenzumrichters geführt werden. Durch diese Verkabelung werden vor allem die hochfrequenten Störungen in der Stromversorgung durch kapazitives Übersprechen an der Datenleitung empfangen. Aufgrund der verwendeten Bandbreite der Kommunikation sind hierbei vor allem die durch den Frequenzum-

richter entstehenden hochfrequenten Netzurückwirkungen relevant.

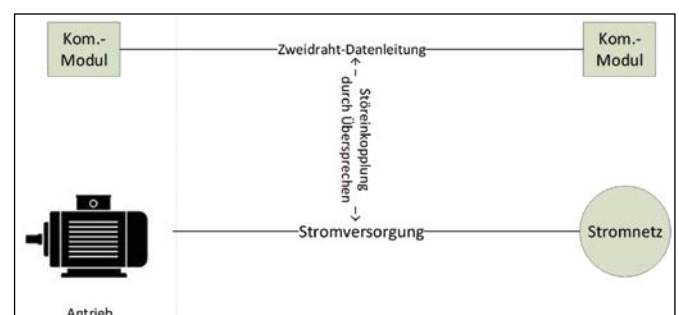


Abbildung 1: Blockschaftbild der Übertragungsstrecke

Der Antrieb soll dabei ein realitätsnahes Leistungsprofil nutzen. Zur Erzeugung realer industrienaheer Störungen wird ein Antrieb mit Frequenzumrichter verwendet. Da in industrielle Anwendung in der Regel der Motor nicht im Leerlauf dreht, wird mithilfe eines zweiten Motors ein definiertes Gegen-Drehmoment erzeugt. Dieses Drehmoment wird mit einer Messwelle gemessen, so dass auch die Leistung dadurch exakt bestimmt werden kann.

Für die Messungen wurde der eigens entwickelte Physical-Layer-Analyzer verwendet, welcher aus mehreren Kommunikationsmodulen besteht. Jedes Kommunikationsmodul besteht aus einem digitalen Signalprozessor (DSP) und einem analogen Frontend. Auf dem digitalen Signalprozessor erfolgt die Verarbeitung, Modulation, Kodierung, Synchronisation und Entzerrung des Übertragungssignals. Dabei können Störungen in der Kommunikation erkannt und analysiert werden. Genauere Informationen können den entsprechenden Veröffentlichungen entnommen werden. [1] [2] [3]

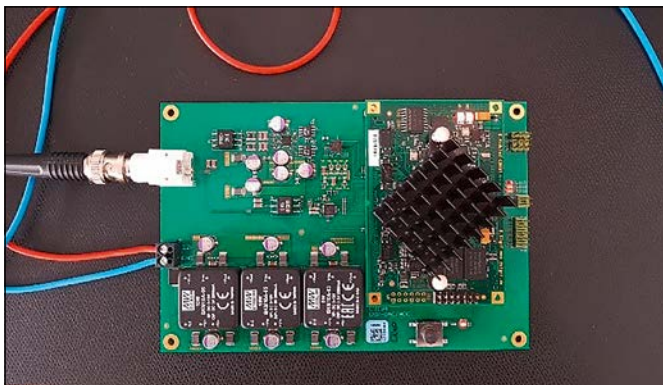


Abbildung 2: Kommunikationsmodul

2 Übertragungskanal

Es wurden Messungen mit den Kommunikationsmodulen und mit Frequenzumrichter als Störquellen durchgeführt. Als Übertragungsmedium wurde ein Flachbandkabel verwendet, welches parallel die Stromversorgung der Antriebe und die Datenleitungen führt. Es wurden ein Kommunikationsmodul als Sender (PLA 1) und eine als Empfänger (PLA 2) betrieben. Empfänger und Oszilloskop sind hochohmig an den Übertragungskanal angeschlossen, wobei der Abstand zwischen den Kommunikationsmodulen variabel bis zu 100 Metern beträgt. Bei der verwendeten physikalischen Bandbreite von 1-30 MHz treten hier Reflektionen, Dämpfungen und Übersprechen auf, welche eine starke Dämpfung und Phasenverzerrung des Signals erwirken.

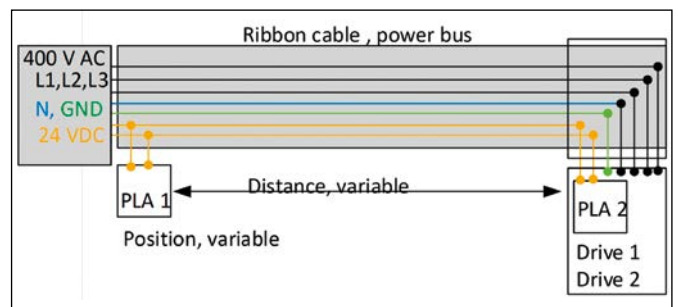


Abbildung 3: Konzept des Übertragungskanals mit paralleler Stromführung



Abbildung 4: Flachbandkabel zur Versorgung der Antriebe im Labor

Die Komponenten der digitalen Signalverarbeitung werden an PLA 2 ausgewertet. Dabei werden bekannte Pakete demoduliert, dekodiert und anschließend die Anzahl der fehlerbehafteten Bytes gezählt.

3 Störungen

Mit in der Datenleitung parallel geführten Phasen L1, L2 und L3 wird ein Motorteststand, bestehend aus einem Asynchron- und Servo-Motor, betrieben. Dabei wird mit unterschiedlichen Drehzahlen und Drehmoment getestet. Dabei breiten sich hochfrequente Störimpulse insbesondere auch über die Schutzterde (PE) aber auch über die Phasen L1, L2 und L3 [4] [5] aus, welche sich dann wiederum feldgebunden auf die Datenleitungen einkoppeln.

Die Störimpulse werden hauptsächlich aus zwei Störquellen erzeugt, das Schalten der IGBT auf Sekundärseite der Umrichter sowie die Stromkommutierung auf Primärseite der Umrichter.

Mit dem Physical Layer Analyzer kann die Auswirkung der Störimpulse auf die Kommunikation genau untersucht werden. Treten Störungen in der Präambel auf, kann die Synchronisation gestört sein, Störungen in den Nutzdaten können trotz Forward-Error-Correction (FEC) zu Bitfehlern führen.

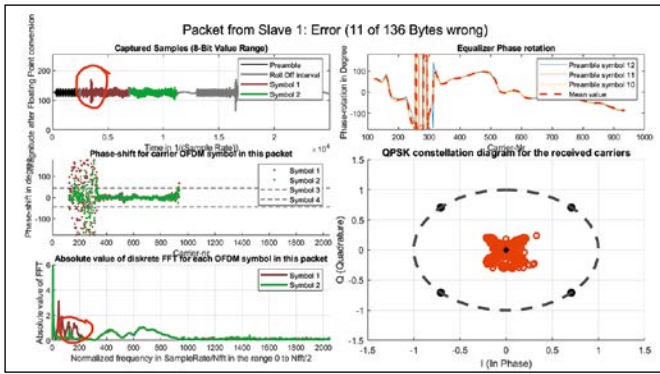


Abbildung 5: Kommunikation mit Störimpuls: Zeitverlauf des Signals (links oben), Phasenkorrektur (rechts oben), verbleibender Phasenfehler (Mitte links), Betragsfrequenzgang (links unten), Konstellationsdiagramm (rechts unten)

Wie in Abbildung 5 erkennbar, ist die Störleistung vor allem im Frequenzbereich von 1 bis 5MHz.

4 Kompensation

In der Literatur gibt es bereits einige Methoden zur Kompensation von Impulsstörungen [6] [7] [8], welche die Störimpulse anhand eines Schwellwerts erkennen und bei Überschreiten dieses Schwellwerts die einzelnen Samples korrigieren. Dieses senkt die Störleistung durch Impulse, fügt den Nutzdaten jedoch durch das nichtlineare Verhalten ein zusätzliches Rauschen hinzu.

Für eine geringere Fehlerrate wird die Eigenschaft der Störimpulse, die Störleistung im „tiefen“ Frequenzbereich von bis zu 5MHz im Gegensatz zur Nutzbandbreite von 30MHz, genutzt.

Die Autokorrelation zur Synchronisation der Präambel wird um eine Hochpassfilterung erweitert. Mit einem einfachen FIR-Filterung $x(k)=x(k)-x(k-1)$ erweitert sich die Autokorrelation $\Phi(k,p)=\sum x(k)x(k+p)$ zu

$$\Phi(k,p) = \sum (x(k) - x(k - 1))(x(k + p) - x(k + p - 1)).$$

Wobei k die Zeit in Samples und p die Periodendauer der Präambelsymbole ist.

Um diesen Frequenzbereich in den Nutzdaten noch nutzbar zu lassen, soll nur bei Auftreten eines Störimpulses gefiltert werden. Zur Erkennung von Störimpulsen wird die Leistung des Signals verwendet, steigt diese in einem kurzen Zeitraum stark an, wird dies als Störung interpretiert. Dabei kann anhand eines Schwellwerts der Filter gesteuert werden. Ein alternativer Ansatz basiert auf der Steuerung der Filterwirkung als kontinuierliche Funktion der Leistung.

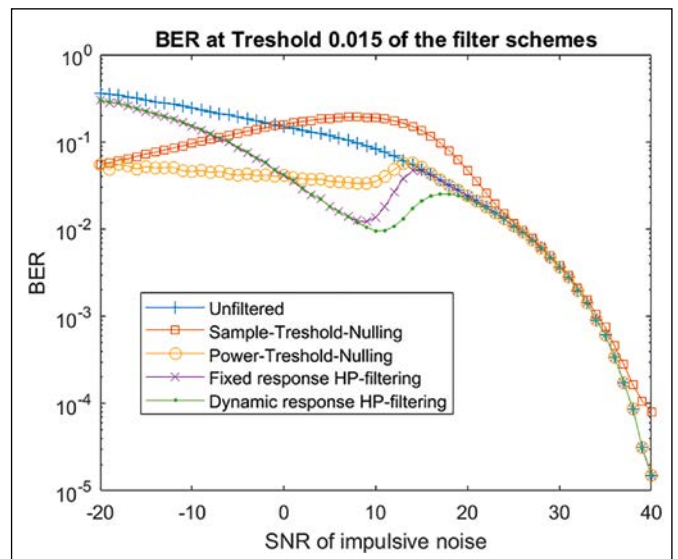
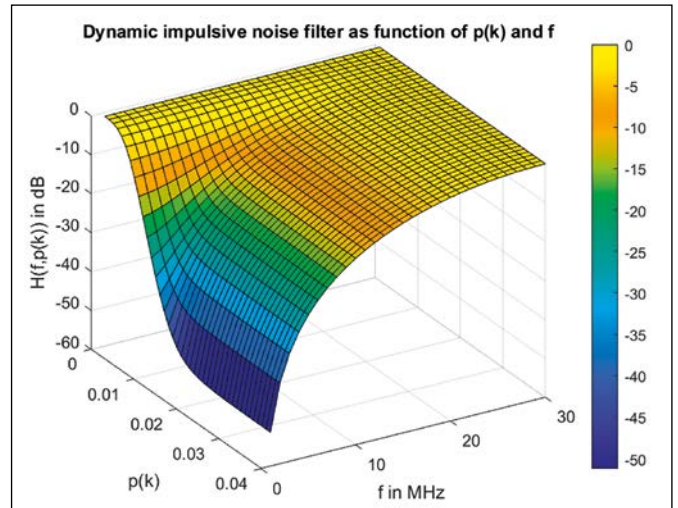


Abbildung 6: Oben: Dynamischer Filter in Abhängigkeit der Signalleistung und der Frequenz; mit steigender Leistung werden die niedrigen Frequenzen stärker bedämpft. Unten: Effektivität verschiedener Filtermethoden in Abhängigkeit der Impulsstärke (SNR)

In Abbildung 6 ist beispielhaft die Filterwirkung in Abhängigkeit der Signalleistung $p(k)$ und der Frequenz dargestellt. Dem unteren Teil der Grafik ist außerdem die verbesserte Entstörung des Signals bei einem Signal-zu-Rausch-Abstand (SNR) von 0 bis 20 dB erkennbar.

Referenzen:

- [1] S. Schaffenroth und M. Bauer, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Schmidt, „Robuste Kommunikationstechniken für Multidrop-Konzepte“, Forschungsbericht der OTH-AW, 2021.
- [2] A. Kölpin, H.-P. Schmidt, A. Gercikow, Sebastian Schaffenroth, “Measurement Platform for Physical-Layer Analysis of Industrial and Automotive Ethernet”, in IEEE Sensors Applications Symposium, Amberg, 2020.
- [3] A. Gercikow, „Modellierung der Datenübertragung für den Einsatz in industriellen Kommunikationssystemen“, Forschungsbericht der OTH-AW, Jg. 2020, pp. 75-78, 2020.
- [4] A. Schramm, „Analyse der Netzzrückwirkungen und Eingangsfilter gepulster leistungselektronischer Umrichter“, 2013.
- [5] J. Franz, EMV – Störungssicherer Aufbau elektronischer Schaltungen, Wiesbaden: Springer Verlag, 2013.
- [6] S. V. Zhidkov, “Impulsive Noise Suppression in OFDM Based Communication Systems”, in IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003.
- [7] S. Zhidkov, “Analysis and comparison of several simple impulsive noise mitigation schemes for OFDM receivers”, IEEE Transactions on Communications, 2008.
- [8] K. S. A. Mawali, „Modulation, Techniques for Broadband Power Line Communications: Impulsive Noise Mitigation and Adaptive,“ RMIT University, 2011.
- [9] A. Fuchs, Hans-Peter Schmidt, “I 4.0 Technology Demonstrator for Reasearch, Development and Education”, in research report of OTH Amberg-Weiden, 2019.
- [10] Z. Ali, “Hybrid Median-Nulling Scheme for Impulsive Noise Mitigation in OFDM Transmission”, Space and Upper Atmosphere Research Commision, Karachi, 2014.

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

max.bauer@oth-aw.de

Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
Josefine Rößle-Kress, Ass. Jur.
Juliana Hartig, M.A.
Michael Gleißner, B. Eng.
Petra Thomas
Ann-Christin Schleser, B. Eng.
Sabrina Richtmann, M.A.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Zusammenfassung

IoT-Lösungen ermöglichen es, Arbeitsabläufe und Prozesse in Krankenhäusern effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten. Ein Blick in die Zukunft des Krankenhausalltags verdeutlicht das Potenzial von IoT-Lösungen und deren positiven und nachhaltigen Einfluss auf den gesamten Versorgungsprozess von Krankenhäusern. Da der größte Nutzen von IoT in der Datenerhebung liegt, ist besonders der Bereich der Diagnostik für den Einsatz dieser Geräte geeignet. Ebenso kann der Behandlungsprozess in Zukunft mithilfe von IoT patientenorientiert optimiert werden. Aus der Frage, welche IoT-Geräte für den Einsatz in Krankenhäusern sinnvoll sind und eine tatsächliche Verbesserung mit sich bringen, ergibt sich ein technologisches Zukunftskonzept, das heute allerdings noch nicht Versorgungsalltag ist. Krankenhäuser sehen sich in diesem Zusammenhang insbesondere technischen, finanziellen, organisatorischen sowie rechtlichen Herausforderungen gegenüber.

Abstract

IoT solutions make it possible to design workflows and processes in hospitals more efficiently and economically. A look into the future of everyday hospital life illustrates the potential of IoT solutions and their positive and sustainable impact on the entire care process of hospitals. Since the greatest benefit of IoT lies in data collection, the area of diagnostics is particularly suitable for the use of these devices. Likewise, the treatment process can be optimized in the future with the help of IoT in a patient-oriented manner. The question of which IoT devices make sense to be used in hospitals and bring about an actual improvement results in a technological concept for the future, which, however, is not yet part of everyday care today. Hospitals face technical, financial, organizational and legal challenges in this context in particular.

1 Einleitung

Die Verwendung neuer digitaler Technologien ermöglicht es, Prozesse in Einrichtungen des Gesundheitswesens effizienter und wirtschaftlicher zu gestalten. IoT-Lösungen versprechen dabei Arbeitsabläufe und Prozesse in Krankenhäusern positiv und nachhaltig zu beeinflussen: Das Internet of Things (IoT) (deutsch: Internet der Dinge) ist ein Netzwerk von mit dem Internet verbundenen Geräten, die eingebettete Sensordaten zur zentralen Verarbeitung an die Cloud übermitteln [1]. Sobald die Daten gesammelt sind, können sie analysiert werden, um aussagekräftige, verwertbare Erkenntnisse zu gewinnen. Tracking- bzw. Lokalisierungstechnologien optimieren Logistikprozesse; über intelligente Regelungssysteme wird die Gebäu-

detechnik effizienter gestaltet und mithilfe der automatischen Ermittlung des Wartungsbedarfs (Predictive Maintenance) kann die Instandhaltung von Geräten und Anlagen gesteuert werden. Darüber hinaus erleichtert IoT die Kommunikation und unterstützt Ärztinnen und Ärzte bei Diagnose, Therapie und Forschung [2].

Trotz des großen Potenzials ist die Einführung der IoT-Technologie mit großen Herausforderungen verbunden. Laut einer aktuellen Umfrage [3] ausgewählter europäischer Länder gaben 31,5 Prozent der befragten Ärztinnen und Ärzte sowie Pflegekräfte aus Deutschland an, dass sie bzw. ihre Organisation wenig auf die Einführung digitaler Technologien vorbereitet seien. 47,3 Prozent gaben an, dass sie angemessen gut und 18,8 Prozent sehr

gut gerüstet seien. Die Vorbereitung alleine stellt dabei jedoch nicht die einzige Hürde bei der Einführung der IoT-Technologie dar. Krankenhäuser sehen sich insbesondere vor technische, finanzielle, organisatorische sowie rechtliche Herausforderungen gestellt.

Im Rahmen des Projekts 5G4Healthcare werden an der Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen und Gesundheit der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden die Einsatzmöglichkeiten und Potenziale von IoT-Technologien im Gesundheitswesen erforscht. Dabei werden im Rahmen der beiden zentralen Use Cases des Projektes, „Integrierte Versorgung“ und „Homecare“, eine Vielzahl von Anwendungsszenarien konzipiert und umgesetzt, in denen die Effekte des Einsatzes von IoT aus unterschiedlichen Perspektiven bewertet werden. So werden z. B. bei dem Einsatz von Tracking- und Lokalisierungslösungen im klinischen Umfeld nicht nur deren wirtschaftliche Konsequenzen hinterfragt, sondern ebenso rechtliche, technische und organisatorische Kontextfaktoren der Umsetzung.

2 Zukunftskonzept IoT

Ein Blick in die Zukunft eines Krankenhausalltags verdeutlicht das Potenzial von IoT-Lösungen und deren positiven und nachhaltigen Einfluss auf den gesamten Versorgungsprozess von Krankenhäusern. Anhand der Prozesse Diagnostik sowie Behandlung und Therapie lässt sich aufzuzeigen, inwiefern IoT-Lösungen diese Abläufe im Vergleich zum heutigen Status quo optimieren können.

Diagnostik

Da der größte Nutzen von IoT in der Datenerhebung, -auswertung und -nutzung liegt, ist besonders der Bereich der Diagnostik für den Einsatz entsprechender Lösungen geeignet. In der Diagnostik wird in diagnostische Verfahren ohne apparative Hilfsmittel (z. B. durch Befragung der Patientinnen und Patienten, Palpation, Perkussion) und diagnostische Verfahren mit apparativen Hilfsmitteln (z. B. Blutuntersuchungen, EKG, Röntgen) unterschieden [4]. Der Einsatz von IoT-Geräten betrifft somit den apparativen Bereich. Durch strukturierte, lückenlose und gut aufbereitete Daten mit hoher Qualität kann der Leistungserbringer schneller und sicherer eine Diagnose stellen. Diagnostische Fehler können damit minimiert werden, was laut einer amerikanischen Studie bei über fünf Prozent der ambulanten Patientinnen und Patienten der Fall ist mit jeweils unterschiedlich gravierenden Folgen [5]. Der Bereich Diagnostik bezeichnet dabei die Fähigkeit, explizite Aussagen über Zustände und Merkmale von Patientinnen und Patienten zu treffen, die die Ergebnisse eines reflektierten und methodisch kontrollierten Prozesses sind [6]. Der diagnostische Prozess beginnt direkt nach der Aufnahme durch die Anamnese

und eine ggf. körperliche Untersuchung der Patientin oder des Patienten. Die körperliche Untersuchung richtet sich nach der Wahrscheinlichkeit, Therapierbarkeit und Bedrohlichkeit der Differenzialdiagnosen. Je nachdem, welche Informationen zur endgültigen Bestätigung einer Diagnose benötigt werden, werden Maßnahmen nach Aufwand und Risiko abgewogen eingeleitet, die die Diagnose spezifizieren. Hierbei findet der Übergang in die apparative Diagnostik statt. Dabei muss die behandelnde Ärztin bzw. der behandelnde Arzt stets das Risiko abwägen, welches der Einsatz apparativer Methoden mit sich bringt (z. B. Röntgenbestrahlung) [7]. Dieser Prozess kann durch IoT sowohl beschleunigt als auch zuverlässiger gemacht werden.

Für den diagnostischen Bereich eignen sich vor allem Geräte von sogenannten „Medical Body area networks“ (MBANs) [5]. Dabei handelt es sich um Geräte, die der Patient oder die Patientin am Körper tragen kann und die dauerhaft und drahtlos mit einem Speicherort der Daten kommunizieren. Geeignet sind hierfür beispielsweise Geräte wie Einweg-Blutdrucksensoren (Miniatur-Silizium-MEMS-Drucksensor), ein elektronisches Stethoskop (piezoelektrischer Film als Kontaktmikrofon), Herz-Rhythmus-Monitoring-Sensoren (piezoelektrischer Filmvibrationssensor) oder Harnkatheter mit Temperatursensoren (überwachen der Körpertemperatur, während die Blase entleert wird) [6].

Somit fokussiert sich der Nutzen von IoT-Geräten in der Diagnostik vor allem auf die apparativen Bereiche bildgebender Verfahren, die Messung elektrischer Felder des Körpers und auf Funktionsuntersuchungen (Punkte drei, vier und fünf aus obenstehender Aufzählung). Sobald also ein Indikationsverdacht durch die Erstdiagnose vorliegt, der mit diesen apparativen Methoden bestätigt werden kann, können IoT-Geräte hier unterstützen und den Arbeitsalltag der Ärztin oder des Arztes erleichtern. Ein Beispiel hierfür ist eine Patientin oder ein Patient, die bzw. der an Diabetes, Bluthochdruck, Übergewicht oder Herzkreislaufproblemen leidet. Bei diesen Krankheitsbildern ist eine kontinuierliche Messung der Vitalwerte entscheidend, um die Therapie, insbesondere die Medikation korrekt einzustellen. Über den Gesundheitszustand dieser Patientinnen und Patienten werden derzeit Messwerte im Abstand von mehreren Wochen erhoben. Dadurch können negative Veränderungen oder starke, spontane Schwankungen übersehen werden.

Durch den Einsatz eines IoT-Geräts, welches kontinuierlich die Vitalwerte der Patientinnen bzw. der Patienten misst und die Daten direkt an die Ärztin oder den Arzt übermittelt, können diese Veränderungen registriert und die Behandlung angepasst werden. Dabei können die Patientinnen und Patienten die Vitalwerte selbst messen und übertragen. In Kombination mit einer telemedizinischen Kontaktmöglichkeit zur Ärztin bzw. zum Arzt

erspart sich auch die Patientin bzw. der Patient lange Wartezeiten in Arztpraxen und Reisewege. Es können Blutzucker, Blutdruck, Gewicht, Wasseranteile oder sogar Herzströme im häuslichen Umfeld der Patientin oder des Patienten aufgenommen werden. Sobald einer der Werte außerhalb des Normbereichs liegt, kontaktiert die Ärztin oder der Arzt die Patientin bzw. den Patienten, um einen Termin in der Praxis zu vereinbaren oder die Medikationsanpassung direkt telefonisch abzustimmen. Die Ärztin bzw. der Arzt verfügt somit über ein Fernüberwachungssystem, wodurch der diagnostische Bereich leichter, sicherer und zeitsparender wird. Eine Zusammenführung der Daten kann dann in einem Dashboard übersichtlich und ohne zeitliche Lücken pro Patient angezeigt werden.

Grundlage für all diese Anwendungen bildet eine entsprechende Netzwerkinfrastruktur, welche die unterschiedlichsten Anforderungen erfüllen muss. Neben den höheren Datenraten, einer geringeren Latenz sowie die gleichzeitige Bedienung einer Vielzahl von Teilnehmern, spielt im Gesundheitswesen eine weitere Anforderung eine zentrale Rolle. Die Zuverlässigkeit des Funksystems muss entsprechend gegeben sein, um medizinische Anwendungen – bei denen es um Menschenleben geht – zu ermöglichen. Aktuell verbreitete WLAN Systeme haben genau hier ihre Schwachstelle. Mit der Definition von 5G (5. Generation des Mobilfunks) soll genau diese adressiert werden.

Dies könnte wie folgt aussehen:

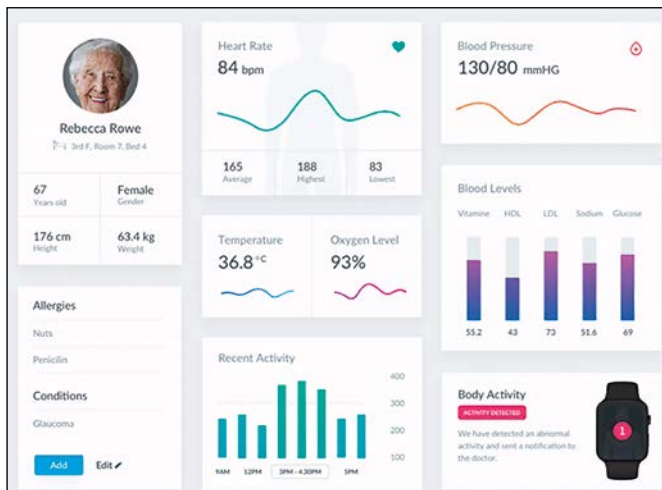


Abbildung 1: Beispiel IoT-Dashboard Patientin (Quelle: <https://dribbble.com/shots/3636518-Healthcare-IoT-Dashboard>)

Durch eine IoT-verbindende Plattform behält der Leistungserbringer die Werte der Patientinnen und Patienten auf einen Blick kontinuierlich im Auge und kann dementsprechend zeitnah und patientenindividuell reagieren. In diesem Szenario können somit aus oben genannten IoT-Geräten Blutdrucksensoren, Herz-Rhythmus-Monitoring, Pulsoxymetrie und Thermophile-Sensoren eingesetzt und miteinander kombiniert werden, je nachdem, welche

Messwerte relevant sind. Neben der Diagnose zählen die sich daraus ergebenden Behandlungen und Therapieansätze zu den zentralen Prozessen im Bereich der Gesundheitsversorgung. Auch dieser Bereich könnte in Zukunft von den vielfältigen IoT-Einsatzmöglichkeiten profitieren.

Behandlung und Therapie

Auch im sich an die Diagnostik anschließenden Behandlungsprozess ergeben sich durch IoT künftig patientenorientierte Optimierungspotenziale. Dies zeigt beispielhaft der IoT-Einsatz im Bereich des Wundmanagements, konkret die Versorgung chronischer Wunden. Im Krankenhaus unterliegt dieser Behandlungsprozess klaren Strukturen und einer vorhandenen, standardisierten Materialversorgung [8]. Heilt eine Wunde nicht innerhalb von acht Wochen ab, wird sie als chronische Wunde bezeichnet. Grund dafür, dass Wunden immer wieder aufgehen, sich nur langsam verschließen oder gar nicht heilen, ist meist eine gestörte Durchblutung oder ein Diabetes mellitus [9]. Eine weitere Ursache sind Druckgeschwüre (Dekubitus) bei immobilen Patientinnen und Patienten. Im Jahr 2017 lag bei ihnen die durchschnittliche Verweildauer im Krankenhaus bei 7,3 Tagen.

Für eine umfassende Gesundheitsanalyse von Patientinnen und Patienten und eine zielgerichtete Behandlung bleibt daher wenig Zeit. Mit der gesunkenen Verweildauer in Kliniken geht eine Arbeitsverdichtung einher, die bei gleichzeitig steigenden Fallzahlen ebenfalls die Wundversorgung von Patientinnen und Patienten betrifft [8]. Durch konstante Überwachung der Wunde können mithilfe von IoT-Lösungen im Rahmen der Versorgung chronischer Wunden derartige Behandlungsprozesse optimiert werden. Zudem wirkt sich der Einsatz von IoT-Geräten positiv auf andere Bereiche aus. So kann durch eine smarte Wundversorgung ein frühzeitiges Eingreifen und Fördern der Wundheilung ermöglicht werden. Arbeitsentlastung und damit mehr Zeit für eine zielgerichtete Behandlung und Betreuung der Patientinnen und Patienten gehören zu den positiven Nebeneffekten. Zwar bedeutet die Beschaffung und Implementierung von IoT-Geräten zunächst das Durchbrechen klarer Strukturen in Einrichtungen. Da der Einsatz intelligenter Lösungen jedoch die Anzahl von Verbandswechseln maßgeblich reduziert, können langfristig auch Materialkosten eingespart werden. Nicht zuletzt wirkt sich der geringere Abfall von benutztem Verbandsmaterial positiv auf die Umwelt aus.

Ein Beispiel für intelligente Lösungen in diesem Bereich sind die in einem Monitoring-System eingebundenen textilbasierten sensorischen Wundaufgaben. Dabei identifizieren und validieren Sensorsysteme bestimmte Parameter im Sekret chronischer Wunden und ermöglichen somit eine kontinuierliche Charakterisierung des Wundzustandes. Mehrere Parameter wie Temperaturerhöhung, Feuchtigkeit und Dehnungen können gleichzeitig

kontrolliert werden, ohne dass es eines Verbandswechsels bedarf. Dadurch sinkt das Infektionsrisiko erheblich. Durch die permanente Überwachung des Wundmilieus wird außerdem die frühzeitige Erkennung und Behandlung möglicher Wundheilungsstörungen ermöglicht. Schließlich wird der Heilungsverlauf einer Wunde kontinuierlich erfasst [10] [11]. Ebenso wichtig wie die Therapie an sich ist die Abstimmung der am Behandlungsprozess Beteiligten.

Mithilfe von IoT-Plattformen in Krankenhäusern könnte die Kommunikation und Koordinierung von Versorgungsaufgaben des Fachpersonals unterstützt und optimiert werden. Über einen individuellen Zugang würden die am Behandlungsprozess Beteiligten die Daten der Patientin bzw. des Patienten und Informationen der vernetzten Geräte erhalten, die der involvierte Akteur für die jeweilige Versorgungsaufgabe benötigt. Das Fachpersonal stimmt dann auf Grundlage der über die Plattform zur Verfügung gestellten Daten die Behandlungsmaßnahmen ab und koordiniert die weiteren Schritte. So kann beispielsweise in der digitalen Wundprechstunde die behandelnde Ärztin oder der behandelnde Arzt im Krankenhaus alle Wundbilder der letzten Wochen, die sowohl von ihr bzw. ihm selbst als auch von der Patientin bzw. dem Patienten oder vom Pflegepersonal zuhause gemacht wurden, miteinander vergleichen und sich ein umfassendes Bild vom Heilungsverlauf und vom Zustand der Wunde machen [12]. Der Einsatz von IoT-Geräten in Krankenhäusern verknüpft mit der Integration einer digitalen Gesundheitsversorgungsplattform, die alle vernetzten Geräte zentral anzeigt und eine sektorübergreifende Informationsquelle bietet, ermöglicht zukünftig eine effizientere Gestaltung von Behandlungsprozessen in Krankenhäusern.

3 Stand der IoT-Landschaft in Krankenhäusern

Der Umstand, dass dieses aufgezeigte – technologisch jedoch durchaus umsetzbare – Konzept derzeit noch nicht Realität für viele Einrichtungen ist, liegt unter anderem an bestehenden Implementierungshürden. Diese setzen sich zusammen aus technischen, finanziellen, organisatorischen und rechtlichen Herausforderungen. Im Rahmen des Forschungsprojektes 5G4Healthcare wurde hierzu herausgearbeitet, dass der aktuelle rechtliche Rahmen keinen ausreichenden IT-Schutz im medizinischen Umfeld garantiert. Die Sicherheit in Bezug auf die Funktionalität wird bereits durch einen Rahmen an Normen und Regelungen sichergestellt. Jedoch ist dies bei dem Schutz vor Hacking-Angriffen noch nicht vollumfänglich gegeben. Einfallstor für Cyberkriminelle bieten weiterhin oftmals medizinische Geräte, die auf veralteter Software betrieben werden. Durch die Verabschiedung der Warenkauf- und der Digitale-Inhalte-Richtlinie und deren nationaler Umsetzung schuldet zwar der Verkäufer/Unternehmer die Bereitstellung von Software-Updates für Waren mit digitalen Elementen. In der Praxis hat der

Verkäufer jedoch – anders als der Hersteller – oft keinen Einfluss darauf, ob Updates entwickelt oder herausgegeben werden. Die Update-Pflicht sollte daher genauso den Hersteller treffen. IoT-Geräte schaffen die Möglichkeit, eine Verbesserung für eine breite Schicht von Patientinnen und Patienten zu erreichen und zugleich dem kontinuierlich zunehmenden finanziellen Druck im Gesundheitswesen mehrwertstiftend zu begegnen. Vor allem an die stationäre Versorgung als größter Kostenblock im deutschen Gesundheitswesen bestehen hohe ökonomische Anforderungen [15]. Der finanzielle Druck kann ebenfalls bei der Anschaffung und Einführung von Medizintechnik und digitalen Lösungen beobachtet werden. Besonders bei kostenintensiven Anschaffungen ist bei Gesundheitseinrichtungen dementsprechend eine gewisse Zurückhaltung zu konstatieren. Medizinische IoT-Geräte bieten demgegenüber den Vorteil, dass sie in der Anschaffung vergleichsweise kostengünstig sind. Je nach Anwendungsfeld sind einzelne Lösungen schnell umgesetzt und benötigen initial keine hohen Investitionssummen. Für das Anwendungsfeld Tracking (z. B. Bettenmanagement) beläuft sich ein RFID-Chip auf lediglich zwischen fünf Cent und zehn Dollar [16].

4 Fazit

IoT in den betrieblichen Ablauf eines Krankenhauses zu integrieren bedeutet, sich mit verschiedensten Aspekten und Prozessen auseinanderzusetzen. Wie obig gezeigt worden ist, gibt es signifikante Hürden, welche es zu bewältigen gilt, um derartige Systeme sicher und zu ihrem vollen Potenzial nutzen zu können. Auch ist es in manchen Bereichen schwer abzuschätzen, ob sich der Aufwand für eine Digitalisierungsstrategie mittels IoT zum aktuellen Zeitpunkt lohnt. Forschungsprojekte wie „5G4Healthcare“ versuchen auf diese Fragestellungen derzeit Antworten zu finden. Dabei zeigt sich trotz bestehender Herausforderungen, dass IoT ein hohes Verbesserungspotenzial im Bereich der Krankenhäuser bietet. Zudem ist langfristig zu erwarten, dass aufgrund der weiter sinkenden Kosten und der steigenden Leistungsfähigkeit dieser Produkte IoT ein Standardwerkzeug in den betrieblichen Prozessen der Krankenhäuser sein wird. Aktuelle öffentliche Förderungen, wie z. B. durch das KHZG, können hier u. a. einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung entsprechend zukunftsorientierter Projekte in Krankenhäusern darstellen.

Referenzen:

- [1] <https://news.microsoft.com/de-at/microsoft-erklart-was-ist-das-internet-of-things-definition-funktionen-von-iot/> (10.09.2021).
- [2] Dr. Raimund Mildner et. al.: Broschüre Facility Management 4.0, 2017.
- [3] Karen Tylor et. al.: Digital transformation Shaping the future of European healthcare, 2020.
- [4] I care Krankheitslehre. 2. überarbeitete Auflage, Stuttgart: Thieme, 2020.
- [5] ResearchGate: (1) (PDF) Developing a primary care patient measure of safety (PC PMOS): A modified Delphi process and face validity testing. https://www.researchgate.net/publication/279753924_Developing_a_primary_care_patient_measure_of_safety_PC_PMOS_A_modified_Delphi_process_and_face_validity_testing (22.06.2021).
- [6] Diagnostik – Online Lexikon für Psychologie und Pädagogik. <https://lexikon.stangl.eu/73/diagnostik> (19.05.2021).
- [7] W. Golder: Nutzen, Kosten und Analytik in der diagnostischen Radiologie: Definitionen und Glossar, 1999.
- [8] Martin Motzkus: Schlaraffenland Krankenhaus?: Wundversorgung und Wirtschaftlichkeit im Umfeld einer Klinik. <https://www.kma-online.de/aktuelles/management/detail/wundversorgung-und-wirtschaftlichkeit-im-umfeld-einer-klinik-a-39608> (17.06.2021).
- [9] Bundesministerium für Gesundheit: Chronische Wunden: Ursachen, Behandlung, Vorbeugung. <https://gesund.bund.de/chronische-wunden#definition> (17.06.2021).
- [10] Dr.-Ing. Marcin Meyer, Dr. Steffen Klabunde: Sensorische Textilien für die smarte Wundversorgung. https://www.medica.de/de/Artikel_Interviews/Sensorische_Textilien_f%C3%BCr_die_smarke_Wundversorgung (17.06.2021).
- [11] Mostafalu, Pooria et al.: Smart Bandage for Monitoring and Treatment of Chronic Wounds. In Small, 2018, 14.
- [12] Prof. Dr. Jörg-Uwe Meyer: Krankenhaus 4.0: Intranet of Everything. In Klinik Management aktuell, 2018.
- [13] Michael Gleißner, Johannes Dotzler, Juliana Hartig, Andreas Aßmuth, Clemens Bulitta: IT Security of Cloud Services and IoT Devices in Healthcare, 2021, S. 1–7.
- [14] Labby, David et al.: Drivers of High-cost Medical Complexity in a Medicaid Population. In Medical care, 2020, 58, S. 208–215.
- [15] Prof. Dr. Christian Johner: Internet der Dinge (IoT) im Gesundheitswesen. In Johner Institut GmbH, 2017.
- [16] Shiklo, Boris: RFID und IoT im Krankenhaus: auf dem Weg zur Digitalisierung. In ScienceSoft, 2018.

Fördergeber:

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt:



Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm

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

s.hamm@oth-aw.de



Ann-Christin Schleser, B.Eng.

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

an.schleser@oth-aw.de



Sabrina Richtmann, M.A.

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

s.richtmann@oth-aw.de



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

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

c.bulitta@oth-aw.de

Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm
Philip Bertelshofer, M.Sc.
Nico Humig, M.Sc.
Venkata Sai Prithvi Raj Thipparaju, M.Sc.
Ann-Christin Schleser, B. Eng.
Sabrina Richtmann, M.A.
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Robotik und Automatisierung im Gesundheitswesen

Zusammenfassung

Innovative Lösungen der Robotik und Automatisierung halten zunehmend Einzug im Gesundheitswesen. Der potenzielle Mehrwert entsprechender Lösungen steht diversen Hemmnissen gegenüber. Besonders hohe Anforderungen im Gesundheitswesen bzgl. des Datenschutzes und der Betriebssicherheit hemmen den Einsatz. Aktuell werden Robotersysteme für minimalinvasive Operationen, zur medizinischen Bildgebung, als Therapiesysteme und für medizinische Simulationen verwendet. Zukünftig finden verstärkt humanoide Roboter, wie z. B. Pepper und Temi, Verwendung zur Unterstützung alltäglicher Aufgaben in der klinischen Versorgung und zur Entlastung von Personal. Technologien im Bereich der Automatisierung bringen im Gesundheitswesen viele Vorteile mit sich und reduzieren den manuellen Arbeitsaufwand, erhöhen den Komfort der Patienten und die Zufriedenheit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Abstract

Innovative robotics and automation solutions are increasingly finding their way into the healthcare sector. The potential added value of such solutions faces various obstacles. Particularly high requirements in the healthcare sector with regard to data protection and operational safety are hampering their use. Currently, robotic systems are used for minimally invasive operations, for medical image, as therapy systems and for medical simulations. In the future, humanoid robots, such as Pepper and Temi, will increasingly be used to support everyday care tasks and relieve staff. Automation technologies bring many benefits to healthcare, reducing manual labor, increasing patient comfort and staff satisfaction.

1 Einleitung

Das Projekt 5G4Healthcare ist eines von sechs Forschungsprojekten, die im Rahmen des 5G-Innovationsprogramms des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert werden. Ziel des Projektes 5G4Healthcare ist es, die Machbarkeit, die Möglichkeiten sowie die Grenzen der Verbesserung der Effektivität und Effizienz in der Gesundheitsversorgung durch die 5G-Technologie auszuloten und Handlungsempfehlungen für skalierbare Lösungen abzuleiten. Unter Führung der OTH Amberg-Weiden wird der Einsatz von 5G in den beiden Use Cases „Integrierte Versorgung“ und „Homecare“ konzipiert (Phase 1), modellhaft implementiert (Phase 2), erprobt und evaluiert (Phase 3). Im Rahmen des Projekts erfolgt u. a. eine intensive Auseinandersetzung mit den

Einsatzmöglichkeiten von Automatisierung und Robotik im Gesundheitswesen im Kontext der 5G-Technologie. Dabei wird u. a. untersucht, in welchen Anwendungsfällen die größten wirtschaftlichen Effekte erzielt werden und wie durch Automatisierungs- und Robotiklösungen Pflegekräfte entlastet werden können. Dabei werden in einem umfassenden Ansatz verschiedenste Kontextfaktoren, d. h. z. B. rechtlich-regulatorische sowie organisatorische Fragestellungen, berücksichtigt.

Seit Jahrzehnten bilden Roboter einen festen Bestandteil in der Industrieautomation, wohingegen das Thema Robotik in der Gesundheitswirtschaft erst in den letzten Jahren zunehmendes Interesse erreicht hat. Der Einsatz von Robotern im Gesundheitswesen bietet die Möglichkeit, der zunehmenden Alterung und dem daraus resultie-

renden wachsenden Bedarf an Pflege- und Gesundheitsdienstleistungen erfolgreich zu begegnen. Dieser Bedarf kann aufgrund einer abnehmenden Zahl an Erwerbstätigen nicht mehr mit den vorhandenen verfügbaren Ressourcen gedeckt werden. Robotersysteme können Prozesse effizienter gestalten und dadurch das Gesundheitssystem entlasten. Allerdings sind erst wenige robotische Produkte für das Gesundheitswesen auf dem Markt erhältlich. Bei der Erprobung robotischer Systeme werden in vielen Fällen Prototypen eingesetzt, die in dieser Form nicht käuflich zu erwerben sind.

Die zunehmende Aufmerksamkeit, die dem Thema Robotik gewidmet wird, geht nicht mit einem vermehrten Einsatz von Robotersystemen einher. Es kann daher auch nicht von einer breiten Nutzung von Robotersystemen in der deutschen Gesundheitsbranche gesprochen werden. Im Alltag der Endverbraucher dagegen halten Roboter zunehmend Einzug. [1] Der Einsatz von humanoiden Robotern im Haushalt pflegebedürftiger Menschen wird zunehmend akzeptiert, und die Roboter werden nicht mehr als technisches Hilfsmittel, sondern als soziale Akteure wahrgenommen.

2 Zentrale Technologien und Methoden der Automatisierung im Gesundheitswesen

Aus der Industrie drängen vermehrt neue Technologien als Trends der Logistik in das Gesundheitswesen, z. B. Big Data, Künstliche Intelligenz, Plattformen, Trackinglösungen und vieles mehr. Allerdings treffen hier hoch innovative Technologien auf zum Teil jahrzehntealte Prozesse, was hinsichtlich der Implementierung eine sehr große Herausforderung darstellen kann. [2]

Tracking

Unter dem Begriff Tracking versteht man die Bestimmung der Position eines Objektes oder einer Person. Die zu transportierende logistische Einheit wird über ein Informationssystem erfasst und verbindet die physische mit der digitalen Welt. Real Time Location Systeme (RTLS) können in Echtzeit eine dreidimensionale Positionserfassung durchführen und auch bewegliche Objekte fortlaufend und präzise verfolgen [3]. Ein RTLS-System verwendet häufig die Funk-Technologien Bluetooth Low Energie (BLE), Radio Frequency Identification (RFID), WiFi, Globale Satelliten-Navigationssysteme (GNSS), Mobilfunk oder Ultra-Wideband (UWB) [4] [5]. Für Indoor-Anwendungen im Gesundheitsbereich, wie z. B. kontinuierliches Asset-Tracking in einem vollständig vernetzten Gebäude, eignen sich besonders die Funktechnologien BLE und UWB, welche jeweils fest installierte Beacons, mobile Tags und eine Tracking-Software verwenden. Zukünftig kann auch der 5G Mobilfunk – u. a. beim Betrieb eines eigenständigen 5G-Campusnetzes – verwendet werden. BLE und UWB unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eigenschaften und

Anwendung deutlich. BLE sendet Signale im 2,4 Ghz-Frequenzbereich aus und besitzt eine hohe Reichweite von 70 bis 100 m. Das Signal ist anfällig gegenüber Interferenzen, Reflektionen und durchdringt nur wenig Materialien. Über die Signalstärke der Tags wird die Entfernung zu den Beacons ermittelt und die Position trianguliert. Die Nachteile sorgen für eine geringe Genauigkeit von 1 bis 3 m, weshalb sich BLE nur zur Bestimmung der Anwesenheit der Tags in einem Raum eignet. Einen großen Vorteil stellen die geringen Kosten des Systems dar, da BLE standardisiert und weit verbreitet ist. Zudem ist der Stromverbrauch sehr gering und sorgt für eine lange Batterielaufzeit. UWB hingegen verwendet mindestens eine Bandbreite von 500 Mhz im Frequenzbereich von 3,1 bis 10,6 GHz und besitzt eine Reichweite von 10 bis 50 m. Die hohe Bandbreite und eine Impulsdauer im Nanosekunden-Bereich [6] ermöglichen eine geringe Störanfälligkeit gegenüber Interferenzen, anderen Signalen und Multipfad-Effekten durch Reflektionen [5]. Die erreichbare Genauigkeit von 10 cm ermöglicht eine präzise Positionsbestimmung innerhalb eines Raumes [5].

UWB verwendet dabei die Methoden Return-Time-of-Flight (RTof), Time-Difference of Arrival (TDoA) oder Angle-of-Arrival (AoA) zur Bestimmung der Position. Problematisch ist die fehlende Standardisierung, da UWB-Systeme verschiedener Anbieter proprietär und nicht untereinander kompatibel sind. Damit kann sich ein Vendor-Lock-In-Effekt ergeben, und eine kostenintensivere Infrastruktur und zusätzliche Hardware wird für die Implementierung eines UWB-Tracking Systems benötigt. [5] Während das Mobilfunknetzwerk für genaues Tracking bisher GNSS-Signale benötigt und daher nur im Außenbereich eine hohe Genauigkeit besitzt, wird Tracking auch durch das 5G-Mobilfunknetz möglich sein. Mit der Umsetzung von Release 16 des 5G-Standards können 5G-Endgeräte mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich über die Methoden RTof, RSSI und AoA geortet werden. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass neben der 5G-Infrastruktur keine zusätzlichen Anker zur Positionsbestimmung benötigt werden [6].

Einsatzbereiche für Trackinglösungen im Gesundheitswesen sind zahlreich vorhanden. Beispielsweise können mehr Sicherheiten und Freiheiten für Demenzzranke, alte Menschen und Kinder ermöglicht werden. Lokalisiert man Personen mit „Weglauftendenzen“ fortlaufend, entfällt eine persönliche Überwachung durch einen Mitarbeiter. Bei einem Übertreten eines definierten Bereiches können Pflegerinnen und Pfleger alarmiert werden und frühzeitig darauf reagieren [7]. Wichtig hierbei ist die Beachtung des Datenschutzes und dass die Erfassung der Position nur unter Einwilligung des Patienten stattfinden kann. Auf diese Weise werden Patienten effizienter betreut und die knappe Ressource der Personalzeit kann für personen-nahe Pflegetätigkeit investiert werden. Über das aktuelle Bewegungsverhalten von Patientinnen und Patienten hinaus ermöglichen Tracking-Systeme auch eine langfristige

Analyse des Aktivitätslevels der Betroffenen. Medizinisch interessant und relevant sind dabei v. a. Veränderungen, die oftmals schleichend eintreten können und ohne eine dezidierte Analyse des Bewegungsverhaltens – und damit des Gesundheitszustands – gegebenenfalls lange unentdeckt bleiben würden. Das Erkennen von und Reagieren auf plötzlich auftretende Bewegungsänderungen im Rahmen einer Notsituation, z. B. einem Sturz oder langer Inaktivität, verdeutlicht zudem den auch kurzfristigen Mehrwert entsprechender Tracking-Lösungen. [8]

Big Data und Künstliche Intelligenz

Im Rahmen des Projektes 5G4Healthcare bekommen Trends wie Big Data, Künstliche Intelligenz (KI) und Plattformen – insbesondere an der Schnittstelle zum Themenfeld der Robotik und Automatisierung – eine zentrale Rolle, da hierin der Schlüssel für eine Revolution der Logistik im Gesundheitswesen liegen kann. Logistische Operationen im Healthcare-Bereich nehmen an Größe und Komplexität zu und der Zeitraum für Entscheidungen wird zunehmend kürzer. Mit selbstlernenden Algorithmen in der KI lassen sich große Datenmengen analysieren, wodurch beispielsweise Routen und Lieferungen in Kliniken optimiert sowie zuverlässige Bestandsprognosen vorausgesagt werden können. Die Effizienz innerhalb der Logistikketten wird erheblich gesteigert.

Der Begriff Big Data beschreibt eine große und teilweise unstrukturierte Datenmenge aus unterschiedlichen Quellen. Big Data Analytics ermöglicht es, diese große Datenmenge zu sammeln, auszuwerten und zu analysieren. Aufgrund der Vernetzung der Produkte, Systeme und Prozesse wird die zukünftig verfügbare Datenmenge signifikant ansteigen. Auswahlkriterien für den Einsatz von Big Data Analytics bilden die 5V. Volume weist auf die stetig wachsende Datenmenge hin. [9] Nach einer aktuellen Prognose steigt das Volumen der jährlich generierten digitalen Datenmenge von 33 Zettabyte im Jahr 2018 auf 175 im Jahr 2025 [10]. Variety zielt auf die unterschiedlichen Datenquellen, Datenformate und Datenstruktur ab. Velocity bezeichnet die Geschwindigkeit, in der die Daten erzeugt werden und auch darauf zurückgegriffen werden kann. Veracity benennt die Genauigkeit und Glaubwürdigkeit der Daten und Value den unternehmerischen Mehrwert, der durch die Daten generiert werden kann [9].

Big Data Analytics erweitert das Analysenspektrum und bietet neue Methoden, Predictive Analytics und Prescriptive Analytics. Predictive Analytics zielt darauf ab, bei der Entscheidung möglicher, zukünftiger Entwicklungen zu unterstützen. In Kombination mit semantischen Regeln können die Ergebnisse der Analyse direkt in Handlungsempfehlungen transformiert werden. Dies wird als Prescriptive Analytics bezeichnet. [11] Durch die Nutzung von Big Data Analytics kann die Effizienz in allen Bereichen der Logistik enorm gesteigert werden. Künstliche Intelli-

genz hilft die großen Datenmengen von Big Data zu analysieren. Die 5G-Technologie kann bei der Übertragung der Daten eine hohe Effizienz und Effektivität erreichen. Systeme mit KI besitzen die Fähigkeit, komplexe Probleme zu analysieren, zu lösen und aufgrund der gemachten Erfahrungen zu lernen. Basis des KIs sind neuronale Netze. Damit kann die Arbeitsweise eines menschlichen Gehirns simuliert werden. Grundsätzlich lernen diese Systeme neue Dinge dadurch, dass sie ihre Parameter aufgrund von Erfahrungen anpassen. Das neuronale Netz modifiziert sich durch eigene Vorschriften selbst. Wie erfolgreich ein neuronales Netz ist, hängt von dem Faktor Trainingsdatensätze ab.

Mit dem Einsatz der Technologien wie KI und Big Data Analytics lässt sich eine Optimierung des Bestandsmanagements in den Unternehmen sowie in Kliniken erreichen. Durch Big Data Analytics Tools können Bedarfsprognosen zuverlässiger und genauer vorhergesagt werden. Das auf KI-Technologien basierende automatische Errechnen der optimalen Lagergröße führt zu einer Reduktion der Lager- und Sicherheitsbestände sowie zu kürzeren Durchlaufzeiten. Die Produktivität wird gesteigert und die Lagerkosten werden gesenkt. [12]

Plattformen

Im Gesundheitswesen existieren verschiedenste Plattformen für gleiche und unterschiedliche Anwendungsfelder. Die wohl bekannteste Plattformart ist das Krankenhausinformationssystem (KIS), welches als zentrales Steuerelement im Krankenhaus fungiert. Es können Informationen von den vielen Stationen und Stakeholdern abgerufen und erweitert werden, die zum einen Patientinnen und Patienten betreffen oder auch interne Abläufe im Krankenhaus beeinflussen. Zusätzlich verbindet ein KIS meist zahlreiche Softwareprodukte über unterschiedliche Schnittstellen, damit ein Informationsaustausch stattfinden kann. Wie schon angeführt, ist besonders beim Umgang mit Patientendaten ein hoher Grad an Datensicherheit notwendig. Eine entsprechende Nutzerverwaltung mit angepassten Nutzerrechten ist dementsprechend von größter Wichtigkeit. [13]

Weitere Plattformen im medizinischen Umfeld sind sog. PACS-Systeme (Picture Archiving and Communication System), die sich mit der Bildarchivierung befassen. Für die Radiologie wurde analog zum Krankenhausinformationssystem das Radiologieinformationssystem entwickelt, welches genauer auf die Anforderungen einer radiologischen Abteilung bzw. eines radiologischen Zentrums ausgelegt wurde. Neben diesen übergeordneten Plattformen existieren auch zahlreiche telemedizinische Plattformen und Spezialanwendungen. Das Projekt 5G4Healthcare befasst sich z. B. mit der Plattform MIA des Zentrums für Telemedizin in Bad Kissingen und dem potenziellen Nutzen von 5G für diese und andere teleme-

dizinische Plattformen [14]. Hierfür kann verschiedenes Equipment genutzt werden. Klassischerweise werden zur Erfassung der Vitaldaten für die Televisite Medizingeräte wie portable Mehr-Kanal-EKG, Spirometer, Otoskope, Pulsoximeter, Stethoskope (digital), Blutdruckmessgerät, Blutzuckermessgerät, Thermometer und Personenwaagen hinzugezogen.

3 Robotik in der Gesundheitswirtschaft

Anforderungen an den Einsatz von Robotern

Während der Einsatz von Robotik im industriellen Umfeld bereits etabliert ist, steht die Nutzung im Gesundheitsbereich vor einigen Hemmnissen. Damit Roboter im Gesundheitsbereich eingesetzt werden, ist es wichtig, dass die Systeme sicher und verlässlich sind [16]. Weder die Bediener eines Robotersystems noch die Patienten dürfen von diesem verletzt werden. Besonders im Gesundheitsbereich sind die Anforderungen an die Sicherheit groß, da der Mensch im Mittelpunkt der Dienstleistung steht und Roboter direkt mit Patientinnen und Patienten interagieren. Damit Robotersysteme eingesetzt werden können ist eine kontinuierliche Stromversorgung von höchster Wichtigkeit.

Da Krankenhäuser und Kliniken diese Anforderung auch bei anderen medizinischen Geräten besitzen, kann die Versorgung mit Strom, auch bei einem Stromausfall, mit Notstromaggregaten sichergestellt werden. Der Einsatz von Systemen des industriellen Umfelds im Gesundheitsbereich bedarf besonderer Anpassungen an die Hygienebedingungen. Roboter müssen regelmäßig desinfiziert werden und Robotersysteme, welche für operative Eingriffe verwendet werden, besitzen oft einmalig verwendbare Werkzeuge. Während Robotersysteme im industriellen Umfeld von technisch erfahrenen Personen eingerichtet und bedient werden, kann von dieser Technik-Affinität im Gesundheitsbereich nicht ausgegangen werden. Robotersysteme müssen für den Gesundheitsbereich einfach aufgebaut und bedienbar, wartungsarm und lange nutzbar sein. Sie werden nicht nur von Personen mit technischer Ausbildung, sondern besonders von Ärztinnen und Ärzten und medizinischem Fachpersonal ohne Ingenieurausbildung verwendet.

Ein Robotersystem muss neben dem sozialen Aspekt der Arbeitserleichterung und Qualitätsverbesserung einen ökonomischen Mehrwert bieten, sodass ausreichend Anreize vorhanden sind, solche Systeme einzusetzen. Der zeitliche Mehraufwand zur Vorbereitung, Anwendung und Nachbereitung des Robotereinsatzes muss gering sein, damit ökonomische Rationalisierungseffekte auftreten können. Robotersysteme, wie z. B. Exoskelette, können Pflegekräfte physisch entlasten, müssen aber effizient eingesetzt und Mitarbeiter befähigt werden können, damit der zeitliche Aufwand sich verringert. [17]

Soziale, technische und rechtliche Herausforderungen

Die mangelnde Akzeptanz gegenüber der Robotik stellt eine gesamtgesellschaftliche Herausforderung dar, die sich – bedingt durch unzureichende Informationen oder wenig Berührungspunkte mit neuen Technologien – über verschiedenste Stakeholder der Gesundheitsversorgung, -wirtschaft und -politik erstreckt. In der Interaktion mit einem Roboter stellt der mögliche Verlust menschlicher Nähe ein Hemmnis dar, da gerade im Gesundheitsbereich Humanität und Ethik von großer Bedeutung sind. Roboter nehmen in menschlichen Lebensbereichen zu und sind nicht nur als reine Werkzeuge und Maschinen zu verstehen, sondern mehr und mehr als Agenten, Begleiter und Avatare. Abhängig von den Fähigkeiten der Roboter, ergeben sich unterschiedliche ethische Bewertungen. Eine Entscheidungsfindung mittels Algorithmen muss sich an den vier „klassischen“ medizinethischen Prinzipien messen lassen: Respekt vor Autonomie bzw. Selbstbestimmung des Patienten und daraus resultierend die Erfordernis eines informed consent, die Schadensvermeidung und das Unterlassen schädigender Eingriffe, die Fürsorge und die Pflicht zu aktivem Handeln sowie Gerechtigkeit und faire Allokation von Ressourcen im Gesundheitskonzept. [18]

Die Gebrauchstauglichkeit der Systeme hemmt deren Einsatz, denn die Programmierung und Bedienung aktueller Systeme erfordert den Einsatz von Experten und beansprucht viel Zeit. Für den Einsatz von Robotern in Krankenhäusern oder Pflegeeinrichtungen sind zudem infrastrukturelle Anpassungen erforderlich: die Bedienung von Fahrstühlen durch Roboter, Automatisierung von Türen und Beseitigung von Schwellen.[1]

Weiterhin erschweren technische Defizite und Engpässe, wie die Interoperabilität verschiedener Informationssysteme und -technologien, die Digitalisierung und Automatisierung des Gesundheitswesens. Roboter sind grundsätzlich als Produkte zu qualifizieren und daher gilt für Roboter die produktsicherheitsrechtliche Verpflichtung zum Bereitstellen sicherer Produkte, deren Anforderungen im Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) geregelt werden. Nach diesem Gesetz dürfen diese nur auf den Markt gebracht werden, wenn sie bestimmte Sicherheitsstandards erfüllen und nicht die Gesundheit von Personen gefährden. Nicht unwesentlich in diesem Kontext ist die Haftungsfrage gerade in der direkten Mensch-Roboter-Interaktion, in besonders sensiblen Einsatzbereichen wie bei medizinischen Prozessen oder dem Einsatz von Pflegerobotern. Nach dem Vorbild der Tierhalter-, Straßenverkehrs- und Arzneimittelhaftung gilt eine Gefährdungshaftung für digitale automatisierte Prozesse. Die Haftung eines Herstellers ist gemäß Produkthaftungsgesetz geregelt, nach welchem der Hersteller des Produkts verpflichtet ist, wenn durch einen Fehler eines Produktes ein

Schaden entsteht, diesen zu ersetzen. Soweit die Roboter in einem Umfeld eingesetzt werden, in dem sich auch Verbraucher befinden, gelten besondere Anforderungen zum Schutz der Verbraucher. Werden über die Sensorik der Roboter Daten aufgenommen, die als personenbezogen zu qualifizieren sind, gelten die strengen Anforderungen des europäisierten Datenschutzrechts. [18] Vor allem die Angst vor Missbrauch der Patientendaten mindern die Akzeptanz durch den Patienten und die verschiedenen Interessengruppen und stellen ein wesentliches Hemmnis bei der Einführung und Umsetzung von innovativen Technologien dar.

Stand der Technik der Robotik

Operationsrobotik – Chirurgie-Assistenzroboter DaVinci

Der Anteil robotisch assistierter Operationen nimmt in Deutschland kontinuierlich zu. Operationsroboter ermöglichen durch Integration von hochpräzisen Sensoren und flexiblen aktiven Instrumenten eine präzise OP-Leistung. Sie bieten einen Mehrwert für die Qualität der Operation sowie für die Sicherheit sowohl für die Patientinnen und Patienten als auch für die Chirurgen. Als prominentester Vertreter der Operationsroboter hat sich das von der amerikanischen Firma Intuitive Surgical entwickelte DaVinci-System behauptet, welches derzeit das modernste System für minimal-invasive Operationen darstellt. Das System umfasst eine Bedienkonsole für den Chirurgen und mehrere integrierte Bewegungsvorrichtungen am Operationstisch, um das Endoskop und die Instrumente zu führen.

Der Chirurg überwacht den Operationsverlauf durch das Binokular. Bei einer Operation wird in den Körper eine Kamera eingeführt, in welcher sich zwei Optiksysteme befinden. Diese Systeme arbeiten getrennt voneinander. Die synchronisierten Bildinformationen werden in das Sichtsystem der Konsole übertragen. Der Chirurg kann mittels eines speziellen Eingabesystems an der Konsole die Instrumente unter Anwendung eines Tremor-Filters und einer variablen Steuerung der Handbewegung genauestens fernsteuern. Die Handbewegungen werden vom System in präzise Echtzeitbewegungen übertragen. Das DaVinci-System bietet Ärztinnen und Ärzten die gleiche intuitive Steuerung, Bewegungsfreiheit und Gewebeverarbeitung wie die offene Chirurgie. [1] [19]

Humanoider Roboter Pepper

Humanoide Roboter werden in der Gesundheitsversorgung immer beliebter und sind Robotersysteme, welche in Kommunikation und Konstruktion dem menschlichen Abbild ähneln. Solche Roboter sind beliebt, da sie eine natürliche Mensch-Maschine-Kommunikation ermöglichen und durch ihr Auftreten schnell an Vertrauen gewin-

nen. Diese Systeme sind beispielsweise in der Lage, sich mit Ärztinnen und Ärzten telemedizinisch zu verbinden oder werden als interaktive Systeme eingesetzt, um Informationen zu einem bestimmten Thema zu präsentieren. Untersuchungen zeigen, dass Menschen dazu neigen, Roboter-Befehlen mindestens genauso viel Glauben zu schenken wie den Anweisungen und Informationen, die sie von Menschen erhalten. Ein Beispiel für einen humanoiden Roboter stellt der Roboter Pepper von SoftBank robotics dar, welcher in Abbildung 1 zu sehen ist.



Abbildung 1: Humanoider Roboter Pepper

Die Mensch-Maschine-Kommunikation des Pepper-Roboters kann auf viele Arten erfolgen, beispielsweise über Ton und Stimme, da der Roboter mit vier Mikrofonen und zwei Lautsprechern ausgestattet ist. Weiterhin kann die Kommunikation über Bilderfassung mittels 3D-Sensoren und 6 Laser-2D-Sensoren erfolgen, und ein berührungsempfindliches Tablet erhöht die Vielseitigkeit der Interaktion mit dem Roboter. Pepper verwendet ein spezielles Linux-basiertes Betriebssystem namens NAOqi, das mehrere Module und Bibliotheken enthält, die es den Entwicklern ermöglichen, die Ressourcen des Roboters zu steuern [20]. Mithilfe von Pepper ist man in der Lage, hochgradig kundenspezifische Roboterlösungen für das Gesundheitswesen zu liefern.

Die automatisierte Maskenerkennung stellt z. B. eine organisatorische Unterstützung in Arztpraxen oder Pflegeheimen dar. Ein auf Pepper laufender Gesichtserkennungsalgorithmus hilft bei der Erkennung von Personen mit und ohne Maske. Wenn eine Person keine Maske trägt, weist Pepper sie per Sprachsteuerung darauf hin und fordert sie durch entsprechende Anweisungen auf dem Tablet auf, die Maske zu tragen. Parallel dazu erfragt Pepper den Wunsch der Patientin bzw. des Patienten, und basierend auf der Antwort führt Pepper den Patienten zum Sprechzimmer, zur Anmeldung oder zum Wartezimmer. Mithilfe der eingebauten Kameras von Pepper und

personalisierten Gesundheitslösungen können Patienten überwacht werden, sofortiges Feedback geben und erhalten sowie Termine vereinbaren. Pepper ermöglicht es, dass Patientinnen und Patienten mit ihrer Familie über einen Video-Chat kommunizieren und den Kontakt mittels Telepräsenz aufrechterhalten [21].

Große Perspektiven mit 5G

Roboter in der Pflege und in der Medizin allgemein tragen zur digitalen Transformation im Gesundheitsbereich bei. Die 5G-Technologie mit ihren geringen Latenzzeiten, der sicheren Echtzeit-Übertragung großer Datenpakete und einer hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit liefert die Basis dafür. Für roboterunterstützte Operationen ist die 5G-Technologie zum entscheidenden Werkzeug geworden, denn zwischen dem Steuerungsimpuls des Arztes und der Reaktion des OP-Roboters darf es keine langen Verzögerungen geben. Die Daten von Kameras und Sensoren müssen mit höchster Zuverlässigkeit übertragen werden. Durch hohe Datenraten, die unterstützt werden, kann die Steuerung auf hochauflösende Kamerasysteme zurückgreifen und in Echtzeit zuverlässige Informationen liefern.

4 Fazit

Robotersysteme werden im Gesundheitswesen eine zunehmend wichtige Rolle einnehmen. Die gezeigten Anwendungsfälle sind Beispiele für Einsatzmöglichkeiten von Robotersystemen und stellen meist Insellösungen dar, welche aktuell kaum mit anderen Systemen des Gesundheitswesens interagieren. Damit das Gesundheitswesen den jetzigen und zukünftigen Herausforderungen gerecht werden kann, ist eine Weiterentwicklung und Vernetzung der gesamten Wertschöpfungskette notwendig. Im Rahmen der Digitalisierung werden kontinuierlich mehr datenerzeugende Sensoren im Gesundheitswesen eingesetzt. Diese Daten können zukünftig von Künstlichen Intelligenzen verarbeitet werden und automatisiert Aktionen auslösen. Dies ermöglicht, dass Robotersysteme an vielen, noch bisher unmöglichen Stellen eingesetzt werden können. Diese agieren dabei als Akteure, welche die getroffenen Entscheidungen automatisiert ausführen und es entsteht eine patientenfokussierte, präventive und präzise Gesundheitsversorgung. [22]

Referenzen:

- [1] Klein, Graf, Schlömer, Roßberg, Röhricht, Baumgarten: Robotik in der Gesundheitswirtschaft: Einsatzfelder und Potenziale. Heidelberg: medhochzwei, 2017.
- [2] Gallmann, Thomas: Anmerkungen zur Kliniklogistik: Megatrends in der Logistik und im Gesundheitswesen. In Klinik Einkauf, 2021, 03, S. 52–53.
- [3] Schneider, Markus: Lean Factory Design: Gestaltungsprinzipien für die perfekte Produktion und Logistik. München: Hanser, 2016.
- [4] Sadowski, Sebastian; Spachos, Petros: RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things. In IEEE Access, 2018, 6, S. 30149–30161.
- [5] Zafari, Faheem; Gkelias, Athanasios; Leung, Kin K.: A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. In IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21, S. 2568–2599.
- [6] Montella, Raffaele et al.: Internet and Distributed Computing Systems. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [7] Gholamhosseini, Leila; Sadough, Farahnaz; Safaei, Aliasghar: Hospital Real-Time Location System (A Practical Approach in Healthcare): A Narrative Review Article, 2018.
- [8] Kolakowski, J. et al.: UWB/BLE Tracking System for Elderly People Monitoring. In Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20.
- [9] Mertens Peter et al.: Grundzüge der Wirtschaftsinformatik. Springer Gabler, 2017.
- [10] Statista: Daten – Volumen der weltweit generierten Daten 2025 | Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/267974/umfrage/prognose-zum-weltweit-generierten-datenvolumen/> (19.08.2021).
- [11] Bischof Christian: Digitalisierung und Controlling: Technologien, Instrumente, Praxisbeispiele. Haufe, 2018.
- [12] Broschüre Künstliche Intelligenz 2019.
- [13] Klein, Manfred: Was ist ein Krankenhausinformationssystem (KIS)? In Healthcare Computing, 2019.
- [14] Hana: ZTM – MIA. <https://www.ztm.de/produkte/mia> (15.06.2021).
- [15] ZTM (2021b): ZTM – MIA. Online verfügbar unter <https://www.ztm.de/produkte/mia>, zuletzt aktualisiert am 16.06.2021, zuletzt geprüft am 16.06.2021
- [16] Telefonaktiebolaget LM Ericsson: 5G evolution: 3GPP releases 16 & 17 overview. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-nr-evolution> (18.08.2021).
- [17] Schmitt, Claudia T.; Bamberg, Eva (Hrsg.): Psychologie und Nachhaltigkeit: Konzeptionelle Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [18] Maier, Helmut: Grundlagen der Robotik. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2019 // 2016.
- [19] Roboterassistierte Operationen (DaVinci®) – Katholisches Krankenhaus Erfurt. <https://www.kkh-erfurt.de/medizin/roboterassistierte-operationen-davincir/> (05.07.2021).
- [20] Gardecki, Arkadiusz et al.: The Pepper Humanoid Robot in Front Desk Application. 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE). IEEE, 62018, S. 1–7.
- [21] Pepper in Healthcare | SoftBank Robotics. <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/pepper-healthcare-ga> (07.07.2021).
- [22] Yang, Geng et al.: Homecare Robotic Systems for Healthcare 4.0: Visions and Enabling Technologies. In IEEE journal of biomedical and health informatics, 2020, 24, S. 2535–2549.

Fördergeber:

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt:



Prof. Dr. rer. pol. Steffen Hamm

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

s.hamm@oth-aw.de



Ann-Christin Schleser, B.Eng.

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

an.schleser@oth-aw.de



Sabrina Richtmann, M.A.

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

s.richtmann@oth-aw.de



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

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

c.bulitta@oth-aw.de

Zusammenfassung

Durch den erhöhten Bedarf an optimierten Infektionsschutzmaßnahmen während der Corona-Pandemie sind antimikrobielle Oberflächentechnologien verstärkt in den Fokus gerückt. Unsere Arbeitsgruppe untersuchte daher den Einfluss unterschiedlicher Materialien und Oberflächenstrukturen sowie verschiedener Reinigungs- und Desinfektionsmittel auf die Haltbarkeit antimikrobieller Oberflächentechnologien. Unterschiedlich strukturierte Materialien (Glas, Holz, Kunststoff, Metall) und auf Gipskartonplatten geklebte Tapeten wurden mit einer antimikrobiellen Beschichtung auf TiO₂Ag-Basis (HECOSOL GmbH, Bamberg) versehen. An diesen Prüfkörpern wurden dann Abriebtests mit verschiedenen Reinigungs- und Desinfektionsmitteln und Tuchsyste men (Mikrofasertuch, Baumwolltuch, Schaumstofftuch) durchgeführt. Unseren Ergebnissen zufolge haben sowohl die Auswahl der Reinigungs- und Desinfektionsmethoden einschließlich der Wischsysteme als auch das Oberflächenmaterial einen großen Einfluss auf die Haltbarkeit der antimikrobiellen Beschichtungen. Ein großes Potenzial zur Verbesserung der Hygienemaßnahmen könnte außerdem die Trockennebel-desinfektion haben, da relative große Flächen und sogar verdeckte Oberflächen in kurzer Zeit desinfiziert werden können. Daher haben wir das Desinfektionspotenzial der TBT-Trockenvernebelungstechnologie (TBT Desinfektion GmbH & Co. KG, Deutschland) und des entsprechenden Desinfektionsmittels Defeat AR (Biofluid GmbH, Deutschland) im Hinblick auf die mikrobiologische Dekontamination und mögliche schädliche Auswirkungen auf verschiedene technische Geräte untersucht. Die Luftbelastungsmessung ergab eine Reduktion der mikrobiologischen Raumkontamination um ca. 66%. Auch die Dekontamination der Testflächen erwies sich an allen von uns gewählten Messpunkten des Versuchsaufbaus als wirksam.

Abstract

Due to the increased demand for optimized infection control measures during the Corona pandemic, antimicrobial surface technologies have gained more and more interest. Our workgroup did therefore examine the impact of different materials and surface textures, as well as different detergents and disinfectants, on the durability of antimicrobial surface technologies. Differently structured materials (glass, wood, plastics, metal) and wallpaper bonded to plasterboard were coated with an TiO₂Ag based antimicrobial coating (HECOSOL GmbH, Bamberg). These test samples were then used to perform abrasion tests with various cleaning and disinfecting agents and cloth systems (microfiber cloth, cotton cloth, foam cloth). According to our results, both the selection of cleaning and disinfection methods including wiping systems and the surface material have a major impact on the durability of antimicrobial coatings. Due to the fact that a relatively large area and even covered surfaces can be disinfected in a short time, also dry-fog disinfection could have a great potential to improve infection control measures. Therefore, we tested the disinfecting effects of the TBT dry fogging technology (TBT Desinfektion GmbH & Co. KG, Germany) and the corresponding disinfectant Defeat AR (Biofluid GmbH, Germany) with regard to microbiological decontamination and potentially damaging effects on different technical devices. The airburden measurement did show a reduction of approx. 66% of the microbiological room contamination. Similarly, decontamination of test surfaces was shown to be effective at all measuring points we selected in the experimental setup.

Einleitung

Die Notwendigkeit eines funktionierenden Infektionskontrollkonzepts ist im medizinischen Umfeld schon immer von entscheidender Bedeutung. Die Corona-Pandemie hat dies noch deutlicher in den Fokus gerückt. Neben den klassischen Desinfektionsmethoden haben sich in letzter Zeit immer mehr neuartige Technologien zur Desinfektion von Flächen und Geräten entwickelt. Die Infektion durch kontaminierte Oberflächen ist kein abstraktes Risiko, sondern wurde bereits durch mehrere Veröffentlichungen nachgewiesen. [1–3]. Dementsprechend sollte auch die Aufbereitung von Oberflächen im Rahmen eines optimalen Hygienemanagements eine Rolle spielen. Es hat sich gezeigt, dass neuartige antimikrobielle Oberflächen die mikrobiologische Kontamination von Oberflächen langfristig verringern. [4] Wie sich das Material und die Struktur einer Oberfläche auf die Haltbarkeit einer antimikrobiellen Beschichtung auswirken, ist für mögliche klinische Anwendungen von entscheidender Bedeutung. Dies beeinflusst, inwieweit Produkte und Geräte effizient antimikrobiell beschichtet werden können und welche Entscheidungen bereits im Entwicklungsprozess solcher Produkte hinsichtlich der Materialauswahl getroffen werden müssen. Allerdings gibt es bisher nur wenige Studien darüber, wie Oberflächeneigenschaften und Aufbereitung die Haltbarkeit dieser Beschichtungen beeinflussen.

Eine weitere Möglichkeit zur Desinfektion von Oberflächen und damit einhergehend einer Verbesserung der Infektionsprävention bieten Systeme zur Komplettdekontamination des Raumes. Insbesondere die Trockennebeldesinfektion, die in der Lebensmittelindustrie seit Langem ein Thema ist, könnte eine Alternative zu den derzeitigen Methoden darstellen. [5] Die Fähigkeit dieser Technologie, den gesamten Raum in einem einzigen Desinfektionszyklus zu dekontaminieren, hat dazu geführt, dass diese Technologie für die Infektionskontrolle während der Pandemie ernsthaft in Betracht gezogen wird. [6] Es muss geprüft werden, ob diese Desinfektionstechnologien die Anforderungen an hygienische Maßnahmen im medizinischen Bereich erfüllen können.

Andererseits ist gerade im klinischen Umfeld eine Vielzahl von empfindlichen technischen Geräten vorhanden. Insbesondere bei aktiv belüfteten Geräten kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch Vernebelung Rückstände in den Geräten verbleiben und zu einem Defekt führen. Eine schädigende Wirkung auf empfindliche technische Geräte durch eine Raumdekontamination muss daher im Vorfeld geprüft werden, um eine Störung der Geräte und damit eine gestörte Überwachung und Behandlung von Patienten auszuschließen.

Einfluss des Oberflächenmaterials und der Wiederaufbereitung auf die Haltbarkeit antimikrobieller Oberflächen

Prüfkörper aus verschiedenen Materialien (Glas, Kunststoff) wurden mit einer antimikrobiellen Beschichtung auf TiO₂Ag-Basis (HECOSOL GmbH, Bamberg) im Elektro-spray-Verfahren beschichtet. Die Haltbarkeit der Beschichtung wurde an diesen Prüfkörpern durch Abriebtests mit einem Elcometer (Elcometer Instruments GmbH, Aalen) und anschließender Wirksamkeitsprüfung nach der Norm ISO 22196 geprüft. (Abbildung 1)



Abbildung 1: Elcometer Testgerät zur Prüfung der Haltbarkeit

In einem zweiten Schritt wurden verschiedene Materialien (Holz, Glas, Metall) und auf Gipskartonplatten geklebte Tapeten mit dem antimikrobiellen Mittel beschichtet und Scheuertests mit verschiedenen Reinigungs- und Desinfektionsmitteln und Tuchsystemen (Mikrofasertuch, Baumwolltuch, Schaumstofftuch) durchgeführt. (Abbildung 2)

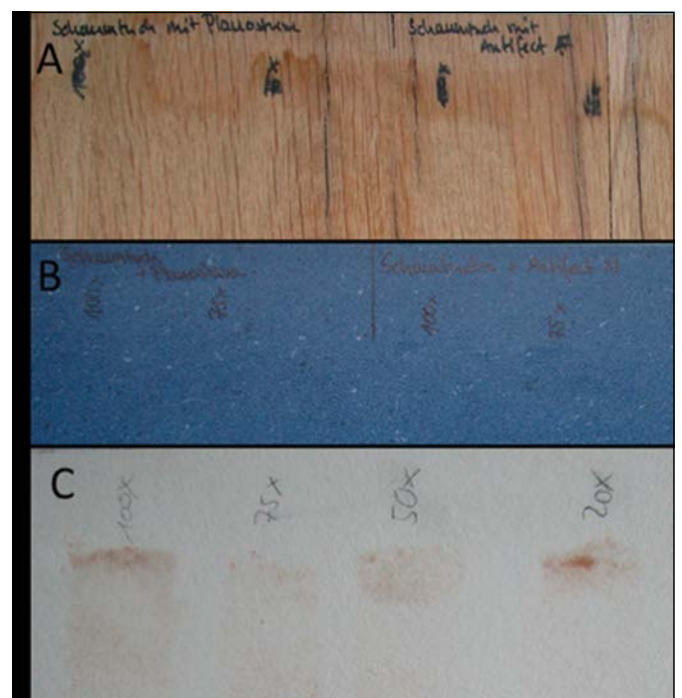


Abbildung 2: Verschiedene Oberflächenproben nach der Wiederaufbereitung (A: Holz, B: Kunststoff, C: Tapete)

Die verbleibende antimikrobielle Wirksamkeit dieser Prüfmuster wurde anschließend ebenfalls durch mikrobiologische Tests ermittelt. Dazu wurden 50µl einer Bakterien suspension (Staphylococcus aureus, ATCC 6538) in einer Konzentration von 1×10^6 KBE/ml auf zuvor aufbereitete Testflächen aufgebracht. Nach dem Trocknen und einer definierten Einwirkzeit (75 Minuten) wurden Abstrichproben entnommen und das Bakterienwachstum dokumentiert.

Die antimikrobielle Wirksamkeit wurde für alle nachfolgend beschichteten Prüfmuster durch ein standardisiertes antimikrobielles Prüfverfahren (ISO 22196) nachgewiesen. (Abbildung 3)

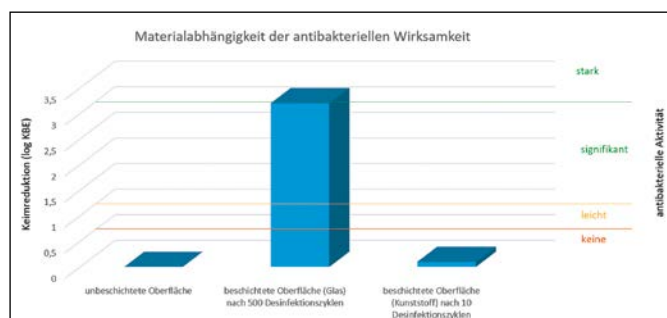


Abbildung 3: Antimikrobielle Aktivität getestet mit ISO 22196 nach mehreren Desinfektionszyklen in Abhängigkeit von verschiedenen Oberflächenmaterialien

Es zeigte sich, dass die Haltbarkeit stark vom zugrundeliegenden Oberflächenmaterial abhängt. Während auf Glasoberflächen auch nach mehreren hundert Abriebzyklen noch eine starke antimikrobielle Wirksamkeit nachgewiesen werden konnte, war diese auf Kunststoffoberflächen schon nach wenigen Zyklen nicht mehr vorhanden.

Auch die Abriebtests mit verschiedenen Reinigungs-, Desinfektionsmitteln und Wischsystemen zeigten einen Einfluss des Materials und der Aufbereitung auf die antimikrobielle Wirksamkeit. Bis auf wenige Ausnahmen zeigten die Testmuster in unserem Versuchsaufbau eine signifikante Wirksamkeit. Die antibakterielle Aktivität wurde gemäß Tabelle 1 klassifiziert. Je nach Keimreduktion bzw. Keimbedeckung wurde die folgende antibakterielle Aktivität bestimmt. (Tabelle 1)

Tabelle 1: Bewertungsschema der Keimreduktion

A	antibakterielle Aktivität	Keimreduktion
	keine	>1500 KBE
	leicht	>500 KBE bis ≤1500 KBE
	signifikant	>5 KBE bis ≤500 KBE
	stark	<5 KBE
B	antibakterielle Aktivität	Keimreduktion
	keine	≥25 %
	leicht	<25 % bis ≤15%
	signifikant	<15 % bis ≤5 %
	stark	<5 %

In unserem Versuchsaufbau zeigten fünf der 47 getesteten Proben noch eine starke Wirksamkeit. Bei nur fünf weiteren Testproben war keine antimikrobielle Aktivität mehr nachweisbar. (Abbildung 4) Auf der anderen Seite zeigte die Mehrheit der Testproben zumindest eine signifikante antimikrobielle Aktivität (31 von 47 Proben). Hier konnte eine Keimreduktion von mindestens 85 % der bewachsenen Fläche oder weniger als 500 KBE pro Platte festgestellt werden.

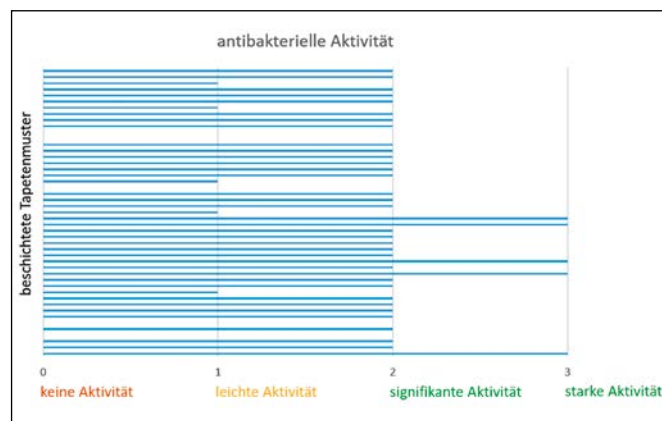


Abbildung 4: Antibakterielle Aktivität auf verschiedenen Oberflächenmaterialien nach der Wiederaufbereitung

Trockenebeldesinfektion als alternative Methode zur Raumdekontamination

Das zugrundeliegende Desinfektionsmittel Defeat AR ist ein Wirkstoff auf Basis von HOCl. Das prinzipielle Desinfektionspotenzial des Desinfektionsmittels wurde in einem ersten Schritt mit dem standardisierten 4-Felder-Test (EN 16615) geprüft. [3] Vier Testfelder (5 cm x 5 cm) wurden im Abstand von 5 cm auf eine Testfläche aufgebracht. Testfläche "1" wurde mit einer definierten Menge an Bakterien suspension (50 µl) kontaminiert. Anschließend wurde das Desinfektionstuch über die Wischstrecke (1-4) geführt und wieder zum Ausgangspunkt zurückgeführt. Um einen möglichst gleichmäßigen Anpressdruck zu erhalten, wurde der Wischvorgang mit einem Gewicht von ca. 2,4 kg durchgeführt. Nach der Einwirkzeit können an jeder der vier Stellen Abstriche entnommen werden. (Abbildung 5)

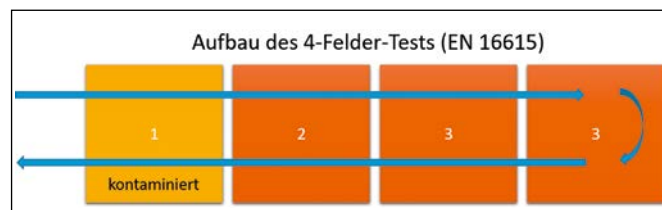


Abbildung 5: Testaufbau für die Durchführung eines Desinfektionstests nach EN 16615

Die Prüfung der Wirksamkeit nach der Norm EN 16615 zeigte zuverlässig eine starke Wirksamkeit des getesteten Desinfektionsmittels. Konstant konnte in allen Testreihen eine Keimreduktion von mehr als 5 log-Stufen oder auf eine Gesamtkeimzahl von weniger als 10 KBE erreicht

werden. Damit erfüllt das Desinfektionsmittel Defeat AR die Anforderungen der EN 16615.

Nach erfolgreicher Bestätigung der Wirksamkeit wurde die TBT-Trockenebelmethode zur Dekontamination mikrobiologischer Verunreinigungen in einem weiteren Versuchsaufbau getestet. Dazu wurden Keramikfliesen mit 50µl einer Suspension von Staphylococcus aureus (ATCC 6538) in einer Konzentration von 1×10^8 KBE/ml verschmutzt. Um die Wirksamkeit der Methode zu ermitteln, wurden die Testmuster geteilt und eine Hälfte mittels einer Petrischale abgedeckt und verklebt. (Abbildung 6)

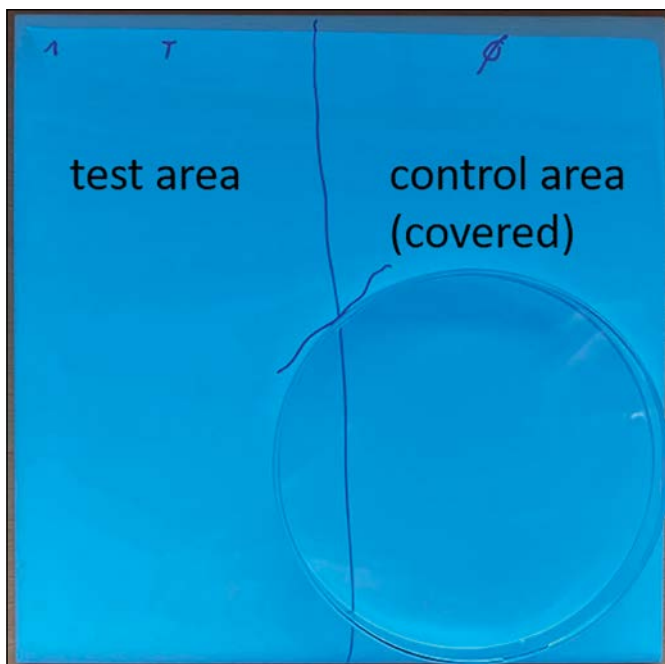


Abbildung 6: Keramikfliese zur Überprüfung der desinfizierenden Wirkung der Methode

Diese Testmuster wurden an sieben verschiedenen Stellen im Raum verteilt. Die Standorte wurden so gewählt, dass bei einigen Testmustern eine direkte Vernebelung möglich war (offener Bereich, Oberseite des Tisches) und zudem auch einige der Fliesen verdeckt/überschattet waren (unter dem Tisch, in einer Schublade). (Abbildung 7)

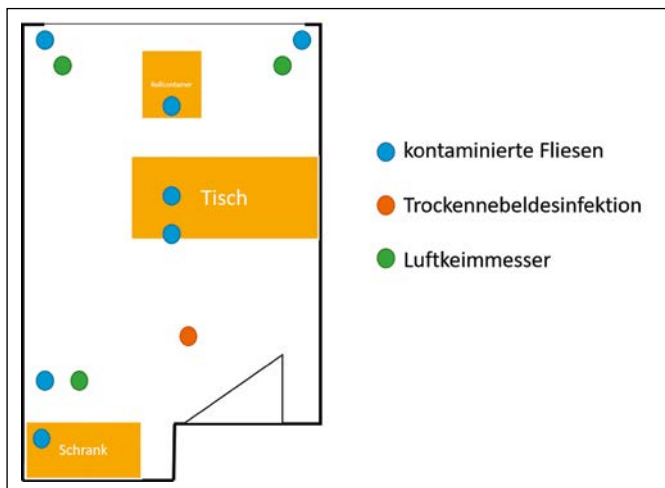


Abbildung 7: Verteilung der Testmuster und Geräte im Raum

Zusätzlich wurden zur Überprüfung der Luftentkeimungseigenschaften aktive Luftkeimsammlungen vor und nach dem Entkeimungszyklus mit einem Klotz Impactor FH6 Luftkeimsammler (Markus Klotz GmbH, Bad Liebenzell, Deutschland) durchgeführt.

Um die Verträglichkeit der Desinfektionsverfahren mit technischen Geräten zu überprüfen, wurden einfache elektronische Prüfkörper eingesetzt. (Abbildung 8) Diese bestehen aus einem Lüfter und einer Platine und wurden nach Beendigung des Desinfektionsprozesses auf mögliche Schäden untersucht. Ebenso wurden die in den Versuchen verwendeten technischen Geräte nach Beendigung der Experimente auf mögliche Schäden untersucht.



Abbildung 8: Elektronische Prüfkörper zur Bestimmung möglicher Beschädigungen

Bei unseren Tests konnte eine keimreduzierende Wirkung der Luftvernebelung festgestellt werden. Bei der Luftkeimmessung belief sich dieser Effekt auf eine Reduktion der mikrobiologischen Raumbelastung von ca. 66%. (Abbildung 9)

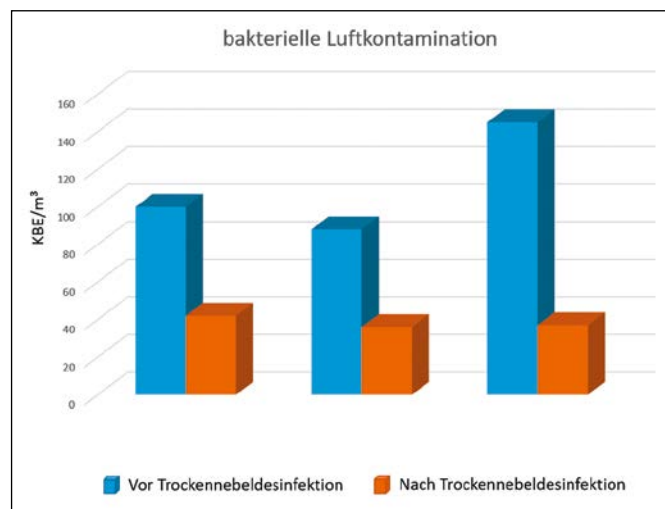


Abbildung 9: Verringerung der bakteriellen Luftverunreinigung nach der Trockenebel-desinfektion

Auch die Dekontamination der Oberflächen erwies sich an allen Messpunkten des von uns gewählten Versuchs-

aufbaus als wirksam. Ausgehend von der berechneten maximal möglichen Kontamination von 5×10^5 KBE erreichte die Vernebelung auf einigen dieser Oberflächen eine Effizienz von >3 log-Stufen. Diese dekontaminierende Wirkung hängt jedoch von der Zugänglichkeit der Oberflächen ab. Während frei zugängliche Testflächen die höchste Keimreduzierung aufwiesen (Standort 1, 2 und 4), wurde dies auf abgedeckten Flächen in deutlich geringerem Umfang beobachtet (Standort 3, 5, 6 und 7). Dennoch zeigte der Vergleich der Kontrollflächen mit den Testflächen durchweg eine deutliche Reduktion der bakteriellen Verunreinigung der Oberfläche. (Tabelle 2)

Tabelle 2: (A) Bewertung des Bakterienwachstums auf den Testproben, (B) Ergebnisse der Keimreduktion auf den Testmustern nach der Dekontamination

A		Bakterienwachstum				Beurteilung		
		>5000 KBE (Rasenwachstum)				++++		
		>500 KBE bis ≤5000 KBE (unvollst. Rasenwachstum)				+++		
		>100 KBE bis ≤500 KBE				++		
		>10 KBE bis ≤100 KBE				+		
		0 KBE bis ≤10 KBE				-		
B Teststelle		1	2	3	4	5	6	7
Keimwachstum (Kontrolle)		++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++
Keimwachstum (Testmuster)		++	++	+++	++	+++	+++	+++

Ein schwieriger Punkt ist die Bewertung der Auswirkungen des Trockennebel-Dekontaminationsverfahrens auf komplexe technische Geräte. Während das Verfahren bei einfachen Geräten keine schädigende Wirkung zeigte, wurden komplexere Geräte, die mit einem kontinuierlichen und präzisen Luftstrom arbeiten (Luftkeimsammler, Partikelsammler), bei unseren Testläufen funktionsunfähig. Nach Rücksprache mit den Technikern war dies auf eine Verstopfung der Lüftungseinheit durch Nebelrückstände zurückzuführen.

Fazit

Unsere Ergebnisse konnten die antibakterielle Wirksamkeit der TBT-Trockennebeltechnik im Allgemeinen bestätigen. Dies deutet darauf hin, dass die Technologie durchaus eine Alternative zu herkömmlichen Dekontaminationsmethoden sein könnte. Die Möglichkeit, einen ganzen Raum in einem einzigen Schritt zu des-

infizieren, wäre ein großer Vorteil und würde viel Zeit sparen. Allerdings gab es starke Unterschiede in der Wirksamkeit in Abhängigkeit von der Zugänglichkeit der Testmuster durch die Maßnahme. Dies könnte zu einer unzureichenden Dekontamination führen, insbesondere an schwer zugänglichen Stellen (Schubladen, Schränke). Daher muss das Testverfahren verfeinert werden, um die tatsächliche Keimreduzierung auf der Grundlage der Verdünnungsstufen genau zu bestimmen. Es sind außerdem weitere Tests erforderlich, um das Potenzial der Technologie genauer zu ermitteln. Ebenso sollten die negativen Auswirkungen des Verfahrens auf komplexere technische Geräte berücksichtigt und genauer untersucht werden. Eine starke und zeitsparende Raumdesinfektion kann nur dann erfolgreich eingesetzt werden, wenn eine Schädigung von technischen Geräten ausgeschlossen werden kann.

Bezüglich der Haltbarkeit von antimikrobiellen Beschichtungen auf verschiedenen Oberflächenarten und den Einfluss unterschiedlicher Aufbereitungsmethoden legen unsere Ergebnisse nahe, dass das zugrundeliegende Oberflächenmaterial einen starken Einfluss auf die Haltbarkeit der antimikrobiellen Oberflächentechnologie hat. Ebenso scheint die Auswahl der Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen sowie der Wischsysteme die Haltbarkeit der Beschichtungen auf verschiedenen Oberflächen zu beeinflussen. Es konnte gezeigt werden, dass auch nach der Aufbereitung der Oberflächen der Großteil der Proben noch eine zumindest signifikante antimikrobielle Aktivität aufweist. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass das Testdesign nicht nach dem Standardverfahren (wie ISO 22196) durchführbar war. Bei vielen Proben waren die Abstände zwischen den zu testenden Flächen sehr gering. Ebenso muss die große Heterogenität der Prüfmateriale berücksichtigt werden. Um mögliche antimikrobielle Wirkungen des reinen Materials selbst ausschließen zu können, sollten alle Materialien gleichzeitig mit einer unbehandelten Kontrolle getestet werden. Auf dieser Grundlage sollte die Wirksamkeit dieser Oberflächentechnologien nicht nur in der Entwicklungsphase, sondern auch am fertigen Produkt und nach mehreren Aufbereitungszyklen im Einsatz geprüft werden, um eine valide Aussage über deren Langzeitaktivität treffen zu können.

Referenzen:

- [1] Noskin GA, Bednarz P, Suriano T, et al. Persistent contamination of fabric-covered furniture by vancomycin-resistant enterococci: implications for upholstery selection in hospitals. *Am J Infect Control* 2000; 28: 311–313. doi:10.1067/mic.2000.108129
- [2] Zachary KC, Bayne PS, Morrison VJ, et al. Contamination of gowns, gloves, and stethoscopes with vancomycin-resistant enterococci. *Infect Control Hosp Epidemiol* 2001; 22: 560–564. doi:10.1086/501952
- [3] Bures S, Fishbain JT, Uyehara CF, et al. Computer keyboards and faucet handles as reservoirs of nosocomial pathogens in the intensive care unit. *Am J Infect Control* 2000; 28: 465–471. doi:10.1067/mic.2000.107267
- [4] Eichner A, Holzmann T, Eckl DB, et al. Novel photodynamic coating reduces the bioburden on near-patient surfaces thereby reducing the risk for onward pathogen transmission: a field study in two hospitals. *J Hosp Infect* 2020; 104: 85–91. doi:10.1016/j.jhin.2019.07.016
- [5] Cossu A, Huang K, Cossu M, et al. Fog, phenolic acids and UV-A light irradiation: A new antimicrobial treatment for decontamination of fresh produce. *Food Microbiol* 2018; 76: 204–208. doi:10.1016/j.fm.2018.05.013
- [6] 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

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



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

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

c.bulitta@oth-aw.de

Dr.-Ing. Philipp Ritt²
Michael Mark, M.Sc.¹
Agnes Pöllmann, M.Sc.¹
Prof. Dr. med. Torsten Kuwert²
Prof. Dr. Ralf Ringler¹

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

Einsatz von Thermolumineszenzdosimetrie (TLD) zur Personendosimetrie bei der selektiven internen Radiotherapie (SIRT) – Möglichkeiten und Limits

Zusammenfassung

TL-Dosimeter speichern die Energie von ionisierender Strahlung und geben diese nach Erwärmung in Form von Lichtemission wieder frei. Dabei handelt es sich um kleine, 2,5 mm große Kristalle, die vielseitig einsetzbar sind. Ein Einsatzgebiet ist der Strahlenschutz für Patient und Personal bei medizinischen Behandlungen in der Diagnostik und Therapie. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird geprüft, ob TL-Dosimeter bei der selektiven internen Radiotherapie einsetzbar sind, um Expositionen während des Verlaufs der Diagnostik und Therapie zu ermitteln, inklusive aller vorbereitenden Arbeitsschritte. Hierzu wurden verschiedene Versuchsaufbauten erstellt, um die Dosimeter zu kalibrieren und daraufhin Messungen durchzuführen. Die Kalibrierung wurde erfolgreich mit einem C-Bogen und Tc-99m durchgeführt, wobei die gemittelte Dosis aller Dosimeter bei der Kalibrierung mit dem C-Bogen eine geringere Streubreite aufweist und bei Tc-99m näher am Referenzwert liegt. Die darauffolgenden Messungen am Versuchsaufbau, der den klinischen Ablauf simuliert, lieferten realistische Ergebnisse für Körperdosis, Augendosis und Oberflächendosis. Zuletzt wurden die Dosimeter in ersten Versuchen bei einer im Klinikum durchgeführten SIRT eingesetzt, um Beta- und Gammastrahlung nachzuweisen. Der Nachweis gelang, und die gemessene Dosis konnte in Gamma- und Betaanteile aufgeteilt werden.

Abstract

TL dosimeters store the energy of ionizing radiation and release it after heating in the form of light emission. These are small 2.5 mm crystals that can be used in many ways. One area of application is radiation protection of patients and staff during medical treatments in diagnostics and therapy. As part of this research project, it is examined whether TL dosimeters can be used in selective internal radiotherapy to determine exposure during diagnosis and therapy, including all preparatory work steps. For this purpose, various test setups were created to calibrate the dosimeters and then carry out measurements. The calibration was successfully carried out with a C-arm and Tc-99m, whereby the average dose of all dosimeters when calibrating with C-arm shows a smaller spread and with Tc-99m is closer to the reference value. The subsequent measurements on the experimental setup, which simulates the clinical process, provided realistic results for body dose, eye dose and surface dose. Finally, the dosimeters were used in initial trials at a SIRT carried out in the clinic to detect beta and gamma radiation. The validation was successful, and the measured dose could be divided into gamma and beta components.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Bei der SIRT handelt es sich um ein Verfahren, bei dem Mikrosphären des Radionuklids Yttrium-90 in die Leber injiziert werden, um durch Radioembolisation Lebertumore

zu behandeln. Im Rahmen der SIRT werden verschiedenste Bildgebungsverfahren benötigt, um die Behandlung vorzubereiten und zu begleiten, sodass Onkologie, Radiologie und die Nuklearmedizin gleichermaßen einen Beitrag leisten müssen, um den Therapieerfolg herbeizuführen [1]. Im Vorfeld werden situationsbedingte Untersuchungen mit Ultraschall, Computertomographie, Magnetresonanztomo-

grafie oder Positronen Emissions-Tomografie mit Computertomografie (PET-CT) durchgeführt, um anatomische Gegebenheiten und Stoffwechselvorgänge darzustellen [1]. Demgegenüber stets erforderlich ist eine Angiografie mit Kontrastmittel und Szintigrafie mittels Technetium-99m markiertem makroaggregiertem Albumin (Tc 99m MAA), um die Verteilung von Partikeln in der Leber vorab zu simulieren und das Shuntvolumen festzustellen [1]. Zuletzt werden die Y-90-Mikrossphären an der Stelle verabreicht, an der auch das Tc-99m-MAA während der Angiografie positioniert wurde, was wiederum mittels Fluoroskopie kontrolliert wird [1].

Die Gesamtdosis der auftretenden Beta-, Gamma-, Röntgen- und Bremsstrahlung könnte mithilfe der TLD ermittelt werden, um den Strahlenschutz bei der Diagnostik und Therapie zu gewährleisten.

1.2 Zielsetzung

Um den Einsatz der TLD zu ermöglichen, müssen die Dosimeter für den nötigen Anwendungsbereich kalibriert werden. Durch vorangehende Forschungsarbeit von Hofmann an der OTH AW konnten verschiedene Methoden zur Kalibrierung bereits erfolgreich etabliert werden [2]. Zum einen ist die Möglichkeit einer Kalibrierung mit dem C-Bogen gegeben, wobei der Heel-Effekt für eine exaktere Kalibrierung ausgeglichen werden muss. Zum anderen kann eine Kalibrierung mit einer homogenen Tc-99m-Quelle durchgeführt werden, wobei auch hier Optimierungen durchgeführt werden müssen, um den Anteil der Rückstreuung zu vermeiden. Auch gilt es die tatsächliche Homogenität der Strahlenquelle zu überprüfen und nötige Anpassungen vorzunehmen.

Für den Anwendungsbereich muss dann ein geeigneter Versuchsaufbau generiert werden, welcher die Situation bei der Durchführung der einzelnen Teiluntersuchungen und der eigentlichen Behandlung geeignet darstellt. In dieser Umgebung müssen die Dosimeter daraufhin geeignet platziert werden, um Strahlendosen an den exponierten Stellen ermitteln zu können. Für Betastrahlung hat bereits das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ermittelt, dass die berufliche Exposition an den Händen des Personals höhere Werte von über 100 Millisievert (mSv) pro Arbeitstag erreichen kann und daher stets überwacht werden muss [3]. Neben den Händen muss für die auftretende Gamma-, Röntgen- und Bremsstrahlung auch eine Dosismessung am Körper und den Augen vorgesehen werden. Die verschiedenen Situationen müssen dann durch Bestrahlung nachgestellt und Dosiswerte ermittelt werden.

2 Methodik zur Kalibrierung und Simulation

Alle Kalibrierungen werden mit einer Dosis von 3000 μGy durchgeführt, die als Referenz über eine Messsonde der Marke RTI Piranha aufgezeichnet wird.

2.1 Kalibrierung der TL-Detektoren mit dem C-Bogen

Für die Kalibrierung mit dem C-Bogen wird ein Patientisch verwendet, auf dem sich ein Wasserphantom befindet. Auf dem Phantom befindet sich die Kalibrierschale mit der Dosismesssonde. Links in der Abbildung 1 ist im Röntgenbild die Messkammer der Messsonde blau eingezeichnet. Um diese Messsonde werden die TL-Dosimeter platziert, um sie anschließend zu bestrahlen. Über den Referenzwert der Messsonde kann dann die Kalibrierung vorgenommen werden. Da ein C-Bogen nicht an jedem Punkt im Bildbereich die gleiche Dosis erzeugt, muss zuvor eine Kalibriermatrix erstellt werden, indem die Messsonde an die Positionen verfahren wird, an der sich später die TL-Dosimeter befinden werden. Mit Dosismessungen an diesen Stellen können Faktoren gebildet werden, die mit den gemessenen Werten bei der eigentlichen Kalibrierung verrechnet werden müssen, um den Abgleich mit der Messsonde herstellen zu können. Das Verrechnen mit einem Faktor kann ohne große Abweichungen vorgenommen werden, da TL-Dosimeter linear auf unterschiedliche Dosen gleicher Herkunft reagieren.



Abbildung 1: Aufbau zur Kalibrierung mit dem C-Bogen

Zur Veranschaulichung ist die Kalibrierschale mit den Messpunkten zur Faktorbildung in Abbildung 2 zu sehen. Die TL-Dosimeter 1-20 werden später entgegen dem Uhrzeigersinn um die Messsonde platziert.

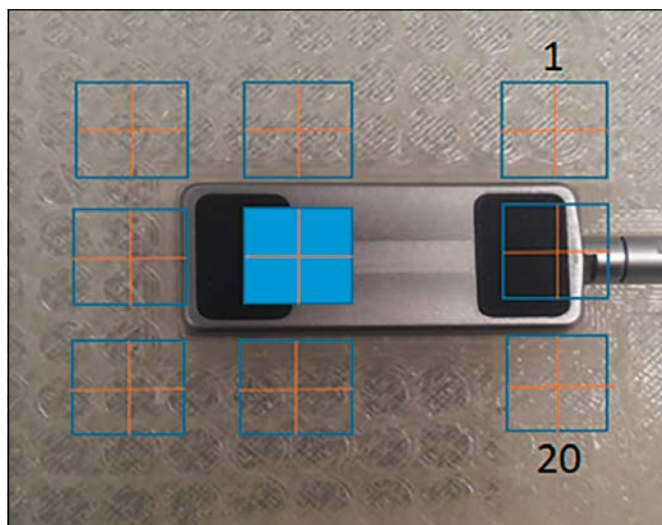


Abbildung 2: Kalibrierschale mit Messpunkten zur Faktorbildung und späterer TL-Position 1 und 20

2.2 Kalibrierung mit Tc-99m

Die Kalibrierung mit Tc-99m verläuft ähnlich mit einem anderen Messaufbau (Abbildung 3). Die Kalibrierschale mit der Sonde wird auf einem kleinen Wasserphantom platziert, in dem sich Tc-99m befindet. Auch das Wasserphantom hat nicht auf jeder Stelle seiner Oberfläche die gleiche Dosisleistung. Daher muss auch hier eine Kalibriermatrix erstellt werden. Um die nötigen Positionen für die Faktorbildung schnell zu erreichen, werden Holzstäbe angebracht. Nun muss die Kalibrierschale nur gegen diese Stäbe bewegt werden, um die richtige Position anzufahren. Bei Messungen mit Tc-99m müssen die Positionen schnell erreicht werden, um die Exposition an den Händen so gering wie möglich zu halten. Zusätzlich wird dieser Aufbau bei der Durchführung in eine Bleiburg gestellt.

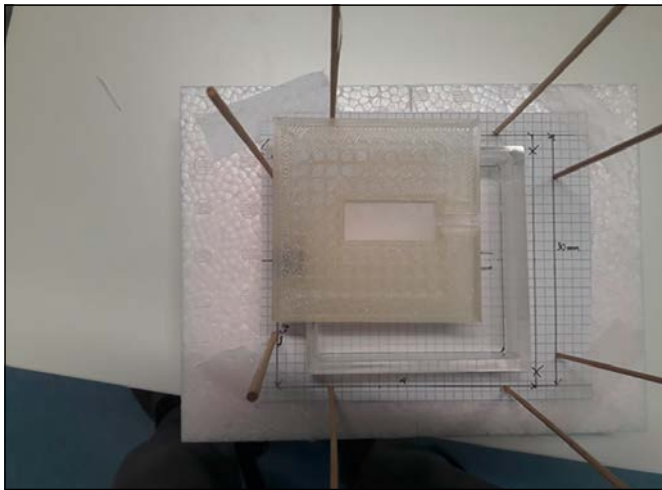


Abbildung 3: Kalibriervorrichtung mit Kalibrierschale, die auf dem Wasserphantom mit Tc-99m platziert wird

2.3 Versuchsaufbau zur Nachstellung des klinischen Umfelds

Für die Versuche werden zwei Personen vorgesehen (Abbildung 4), die sich am Patiententisch und in der Nähe in 2 m Entfernung aufhalten. An diesen werden Halterungen für TL-Dosimeter an den Händen, dem Kopf und dem Körper befestigt. In zwei Versuchsreihen wird in den Laborräumen mit Bestrahlung durch einen C-Bogen bei 80 kV und für Tc-99m mit 150 MBq an Aktivität die Dosis ermittelt, die während der Angiografie und während der Szintigrafie für das Personal im Rahmen der SIRT über 30 min. anfallen würde. Bei den Halterungen handelt es sich um solche, die für die Tiefen-Personendosis Hp (10), Augenlinsendosis Hp (3) und Oberflächendosis Hp (0,07) geeignet sind.

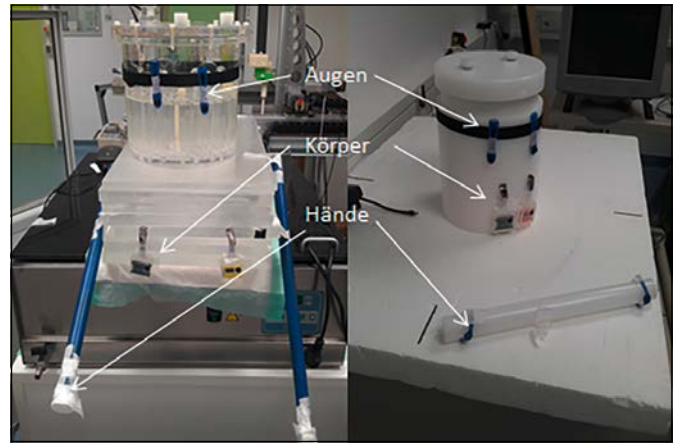


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Messungen mit jeweils zwei Halterungen für Dosimeter an Augen, Körper und Händen der zwei nachgestellten Personen P1 (links) am Patiententisch und P2 (rechts) in 2 m Entfernung.

2.4 Versuche in der Klinik im Rahmen einer SIRT

Über eine Halterung für TL-Dosimeter mit vier verschiedenen Positionen wird der Anteil an Beta- und Gammastrahlung aufgeteilt, wie in Abbildung 5 zu sehen. Dies gelingt, indem die oberen beiden Positionen in der Halterung gefiltert werden und keine Betastrahlung durchlassen, sondern nur Bremsstrahlung und die Streustrahlung des Röntgengeräts. Dieser Dosiswert kann dann von der Position 4 abgezogen werden. Die geschlossene, aber ungefilterte Position 3 kann zusätzlich genutzt werden, um die Schwächung der Gammastrahlung durch das Aluminium zu ermitteln.



Abbildung 5: Halterung für TL-Dosimeter mit vier Positionen

Bei den Versuchen werden TL-Dosimeter bei den vorbereitenden Tätigkeiten in der Bleiburg und in der Applikationsvorrichtung positioniert sowie neben den Händen des/-r Arztes/Ärztin und unter der Applikationsvorrichtung bei der Injektion der Mikrosphären. In der mit Kunststoff umhüllten Applikationsvorrichtung befinden sich die Mikrosphären nochmals in einem Kunststoffzylinder zur Abschirmung der Betastrahlung. Es handelt sich um einmalige Messungen, wobei die Dosimeter zur Auswertung zurück zur Hochschule transportiert werden.

Tabelle 1: Messergebnisse am Versuchsaufbau zur Nachstellung des klinischen Ablaufs bei einer Bestrahlungszeit von 30 Minuten

Person	Dosis C-Bogen mit 80 kV in μGy				Dosis Tc-99m bei 150 MBq in μGy			
	P1		P2		P1		P2	
Seite aus Sicht Person	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links
Augen	1162	1086	30	37	3,2	3,1	0,1	0,1
Körper	1718	1582	11	14	4,8	3,7	0,1	0,1
Hände	3418	507	31	36	20	2,1	0,1	0,2

3 Ergebnisse

3.1 Kalibrierungen

Bei einem Referenzwert von 3000 μGy wurden bei den Kalibrierungen mit dem C-Bogen bei drei Sets mit jeweils 20 TL-Dosimetern Abweichungen von +2,7 % bis -3,9 % im Durchschnitt festgestellt, bei einer Standardabweichung von 56 bis 67. Für Tc 99m konnten bei drei Sets durchschnittlich -0,6 % bis -1,5 % festgestellt werden, bei einer Standardabweichung von 96 bis 146. Mit dem C-Bogen ist daher eine größere Abweichung vom Durchschnitt gegeben und mit Tc-99m eine höhere Streubreite.

3.2 Messungen am Versuchsaufbau

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Bei den Messungen konnte festgestellt werden, dass eine Aktivität von 150 MBq an Tc-99m, welche im Rahmen der Szintigrafie zur Vorbereitung der SIRT appliziert wird und sich im Patienten befindet, im Vergleich zur Durchleuchtung mit einem C-Bogen bei der Angiografie mit einer Röhrenspannung von 80 kV in derselben Zeit 170-350mal weniger Dosis am nebenstehenden Personal verursacht. Die Messungen ergaben für die Augenlinsendosis mit dem C-Bogen 1,1 mGy und nur 3,2 μGy mit Tc-99m bei einer Bestrahlungszeit von 30 min. Diese Dosis-messwerte mit dem C-Bogen wurden mit Werten von Vañó et al. verglichen, wobei diese 0,51-2,66 mSv während 1969 ähnlichen Behandlungen feststellen konnten [4].

3.3 Messungen im klinischen Umfeld

Die Ergebnisse der Messungen aus dem klinischen Umfeld werden in Tabelle 2 dargestellt. Der größte Dosis-messwert für die Betastrahlung konnte bei der Entnahme in der Bleiburg festgestellt werden.

Tabelle 2: Messungen im klinischen Umfeld und Aufteilung in Gamma- und Betaanteil

Position	Gamma-anteil μGy	Betaanteil μGy
In Applikationsvorrichtung nach Entnahme und Positionierung	5,4	0,4
In der Bleiburg bei Entnahme	6,3	259
Neben Händen bei Injektion der Mikrosphären	4,2	14,9
Unterhalb Applikationsvorrichtung bei Injektion der Mikrosphären	31,1	7,4

4 Diskussion/Ausblick

Es konnten TL-Dosimeter vor Ort kalibriert und für eine Abschätzung der Exposition bei der SIRT eingesetzt werden. Nach den Ergebnissen der Messungen im Labor wird gefolgert, dass die größte Gefahr mit Tc-99m eher durch die vorbereitenden Handlungen ausgeht, in denen das Radionuklid in Behältern bei höheren Aktivitäten direkt mit den Händen berührt wird. Gleiches gilt für die Durchführung der Therapie selbst, da der Kunststoff der Applikationsvorrichtung nach den Ergebnissen die Betastrahlung geeignet abschirmt. Bei Bestrahlung mit dem C-Bogen kann auch bereits nach einmaliger Nutzung im Rahmen der Therapie eine hohe Dosis für Augen, Hände und Körper anfallen, so dass geeigneter Strahlenschutz eingeplant werden muss.

In weiteren Projekten wird die Kalibrierung der Dosimeter nochmals verbessert, und neue Anwendungsbereiche werden erschlossen. Die Kooperation mit dem Universitätsklinikum Erlangen erlaubt hierbei einen regen Erfahrungsaustausch, der auch für den Strahlenschutz in der klinischen Praxis einen Mehrwert bietet. Durch Kontrollmessungen mit den kleinen TL-Dosimetern lässt sich die Exposition an Stellen ermitteln, die von den amtlichen Personendosimetern nur unzureichend abgedeckt werden, um Hinweise für die Verbesserung des Strahlenschutzes vor Ort zu erhalten.

Referenzen:

- [1] Hoffmann, Ralf-Thorsten; Reiser, Maximilian; Jacobs, Tobias F.: Selektive interne Radiotherapie (SIRT) – Grundlagen und klinische Anwendung. 1. Aufl., Bremen: UNI-MED-Verl., 2008.
- [2] 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.
- [3] Rimpler, A.; Barth, I.: Beta-Strahler in der Nuklearmedizin – Strahlengefährdung und Strahlenschutz des Personals. In: Der Nuklearmediziner. 28(2005). Nr. 4, S. 240–249.
- [4] Vañó, Eliseo José M.; Sánchez, Roberto M. Dauer, Lawrence T.: Realistic approach to estimate lens doses and cataract radiation risk in cardiology when personal dosimeters have not been regularly used. In: Health Physics. 105(2013). Nr. 4, S. 330–339.

Projektpartner:

Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen

Kontakt:



Michael Mark, M.Sc.

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

m.mark@oth-aw.de



Agnes Pöllmann, M.Sc.

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

a.poellmann@oth-aw.de



Prof. Dr. Ralf Ringler

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

r.ringler@oth-aw.de

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 Glasherstellung als stetiger Innovationsmotor gemeinsam mit Ihnen!



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

#BORN
FOR
HORN

HORN
GLASS INDUSTRIES

Der Systemlieferant für nahezu sämtliche Branchen ...

... und das alles aus einer Hand

PSZ 
electronic GmbH

Supplier of choice through innovation and service!

Die Firma PSZ electronic GmbH ist ein Produzent von maßgeschneiderten Kabelkonfektionen, Kabelsätzen, Schaltschränken sowie Baugruppen vorrangig für (Welt)-Marktführer und bietet in enger Zusammenarbeit mit den Kunden individuelle komplette Komponenten und Systemlösungen an. Die Firmengruppe ist mit über 2.500 Mitarbeitern an vier Standorten weltweit vertreten und produziert speziell für die Heizungs-, Klima- und Medizintechnik, den Maschinen-, Anlagen- und Gerätebau sowie für den Sonderfahrzeugbau. Die PSZ hat sich in den letzten Jahren zum Systemlieferanten entwickelt und bedient die unterschiedlichsten Branchen. Die herausragende Qualität unserer Produkte und Dienstleistungen sind der Garant unseres Erfolges.

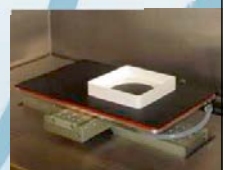
**Kabelkonfektion – elektromechanische Baugruppen – Systemkomponenten
Schaltschränke – Kunststofftechnik – Rapid Prototyping**



Wir bieten eine Perspektive für alle Berufsgruppen!

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

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



PSZ electronic GmbH – Im Gstaadach 6, 92648 Vohenstrauß
info@psz-electronic.com

www.psz-electronic.com - 09651-924 117 – 0
für Bewerber: bewerbung@psz-electronic.com

Zusammenfassung

Die Position einer Vielzahl von Objekten bei Genauigkeiten $< 0,5$ mm kosteneffizient zu bestimmen, stellt eine messtechnische Herausforderung dar. Das Laserlichtschnittverfahren eignet sich prinzipiell hervorragend, um z. B. die translatorische Verschiebung von Objekten, im Bereich der gewünschten Präzision zu messen. In der Praxis wird das Laserlichtschnittverfahren jedoch hauptsächlich für Konturmessungen oder für Abstandsmessungen zwischen zwei Komponenten verwendet. Um verschiedene Anwendungsfelder zu prüfen, werden zwei Tests mit unterschiedlicher Methodik genutzt und die Erkenntnisse zusammengefasst. Dabei werden Schwierigkeiten sowie Möglichkeiten bezüglich verschiedener Anwendungen identifiziert.

In den Versuchen werden Bilder aufgenommen, in welchen sich die Positionen mehrerer Objekte verändern. Eine Software ermöglicht die Kalibrierung und somit eine Umrechnung in die Realpositionen. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Systems kann durch Verbesserung der Messbedingungen erhöht werden.

Erweiterungen der benutzten Hardware können das System zu einer real-time-Applikation aufrüsten. Einige messtechnische Limitationen möglicher Applikationen werden diskutiert.

Abstract

Determining the position of a large number of objects cost-efficiently with accuracies < 0.5 mm is a technical measurement challenge. In principle, the laser light-sectioning method is excellently suited to measure, for example, the translational displacement of objects, within the range of the desired precision. In practice, however, the laser light section method is mainly used for contour measurements or for gap measurements between two components. In order to examine different fields of application, two tests with different methodologies are used and the findings are summarized. Difficulties as well as possibilities regarding different applications are identified. In the tests, images are taken in which the positions of several objects change. A software provides the calibration and thus a conversion to the real positions. The accuracy and reliability of the system can be increased by improving the measurement conditions. Extensions of the used hardware can upgrade the system to a real-time application. Some measurement limitations of possible applications are discussed.

1 Einleitung

Berührungslose 3-D Mess- und Prüfsysteme werden heutzutage in allen Bereichen der Industrie eingesetzt [1]. Sie arbeiten ermüdungsfrei auch an empfindlichen Materialien oder Systemen, ohne diese negativ zu beeinflussen [1][2]. Eines dieser Verfahren ist das Laserlicht-

schnittverfahren, welches eine Erweiterung zum Lasertriangulationsverfahren darstellt. Dabei wird auf ein Objekt mit unterschiedlichen Höhen ein Laserstrahl projiziert. Eine Kamera, positioniert in einem Triangulationswinkel, erfasst die Reflektion der Laserlinie, welche durch den Höhenunterschied im Kamerabild einen Versatz aufweist [1]. Durch eine vorherige Kalibrierung kann der Versatz

auf eine Höhe zurückgerechnet werden. Mit dem richtigen Messaufbau wird eine Messgenauigkeit im Mikrometerbereich erreicht [1]. Das Verfahren kann für eine große Anzahl von Materialien eingesetzt werden, da an die Oberflächeneigenschaft der Messkörper als Anforderung nur eine diffuse Streuung gestellt wird. Dennoch muss beachtet werden, dass die Oberflächenstruktur und die Farbe das Messergebnis beeinflussen [2]. Es ist möglich, mit einem einzigen Sensor mehrere Messobjekte gleichzeitig zu messen. Dies bringt, im Gegensatz zu anderen Messverfahren, bei denen für jede Höhenmessung ein Sensor benötigt wird, sehr große Vorteile bei knappem Bauraum und dient der Kostenreduktion. Bei einer Recherche nach Laserlichtschnittsensoren ist aufgefallen, dass die Anwendung für Multi-Objektmessungen, aufgrund der Softwaregestaltung angebotener Sensoren, schwierig ist. Somit muss in vielen Anwendungsfällen mit mehreren Objekten eine eigene Applikation entwickelt werden. Um ein Proof-of-Concept für eine Anwendung in einem Blendensystem mit über 50 Objekten und der geforderten Genauigkeit der Positionsbestimmung von $< 0,5$ mm zu leisten, werden einige Versuche durchgeführt und Erkenntnisse auf eine mögliche Anwendung aufgezeigt.

2 Material und Methoden

Zwei Applikationen des Laserlichtschnittverfahrens werden aufgebaut und ausgewertet. Methode 1 nutzt, wie vorher beschrieben, einen Triangulationswinkel, um einen Versatz im Kamerabild zu messen und nachfolgend in Matlab auszuwerten. Methode 2 nutzt die je nach Abstand zum Objekt veränderliche Länge der Laserlinie und wertet diese aus.

2.1 Methode 1

Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 1 dargestellt. Für die Aufnahme der Bilddaten werden eine Mono-CMOS-Kamera (COE-032-M-POE-040-IR-C) und ein Linienlaser der Klasse 1 mit einer Wellenlänge von 650 nm verwendet.

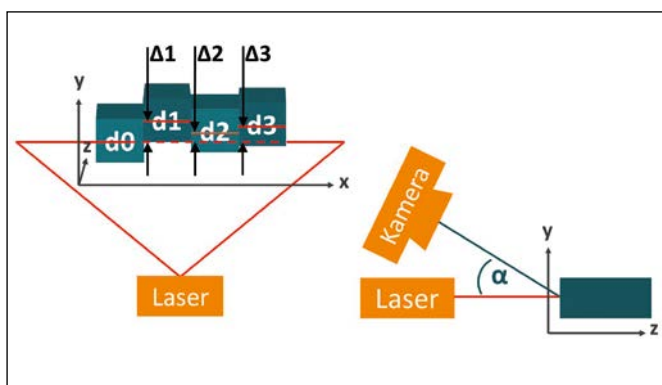


Abbildung 1: Versuchsaufbau für die Bildauswertung mit Matlab

Die vier gleich großen Messobjekte werden für die Distanzmessung zueinander verschoben. Dabei bleibt das Messobjekt d_0 immer an gleicher Stelle und definiert den

Nullpunkt. Die Kamera erfasst den Laserstrahl, welcher durch den Positionsunterschied der Objekte einen Versatz Δ zum Nullpunkt aufweist.

Für die Kalibrierung werden die Objekte mit einem Messschieber zueinander verschoben. Es werden 12 bekannte Höhenunterschiede aufgenommen. Anschließend wird jeweils der Versatz in Pixeln zur Nulllinie auf d_0 gemessen (Abbildung 2). Um eine Funktion für die Umrechnung zu erhalten, wird in Matlab anhand der realen Werte in mm und den gemessenen Versatz in px eine Kalibrierkurve erstellt (Abbildung 3).

Die Kalibrierkurve wird dazu genutzt, um im gleichen Versuchsaufbau unterschiedliche Positionen einer zweiten Messreihe (Tabelle 1) von Pixelwerten in mm Werte umzurechnen.

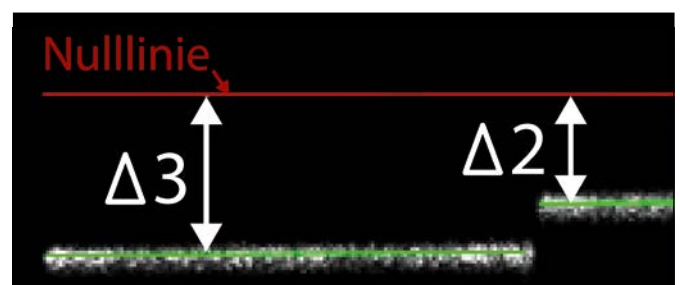


Abbildung 2: Messung des Versatzes zum Nullpunkt

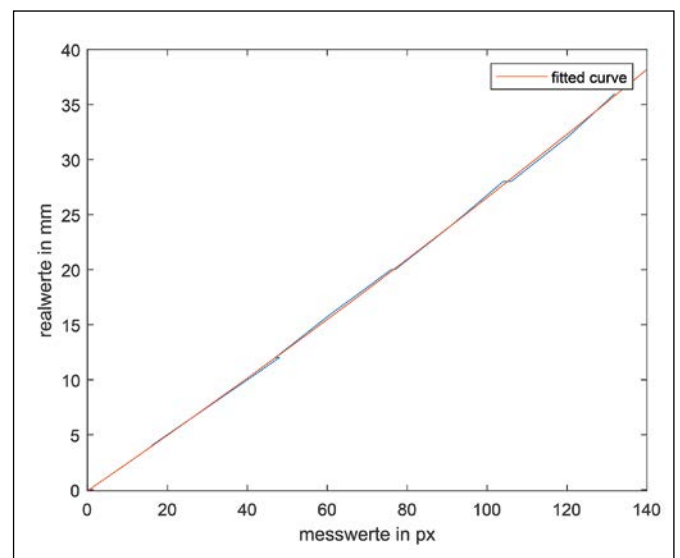


Abbildung 3: Kalibrierkurve in Matlab

2.2 Methode 2

Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau für die Methode 2. Es werden drei Messobjekte mit diffuser Oberfläche in den Farben Gelb, Hellgrün und Weiß in verschiedenen Höhen, aber gleichen Breiten verwendet. Diese werden im 90° Winkel mit einem Linienlaser der Klasse 1 und einer Wellenlänge von 650 nm angestrahlt. Der Fokus des Lasers liegt dabei auf dem Messobjekt d_1 . Die Messaufnahmen werden mithilfe eines Raspberry Pi 4 mit Kamera-

modul V2 seitlich im Winkel α aufgenommen. Es werden drei Kamerawinkel $\alpha=45^\circ$, $\alpha=60^\circ$ und $\alpha=80^\circ$ untersucht.

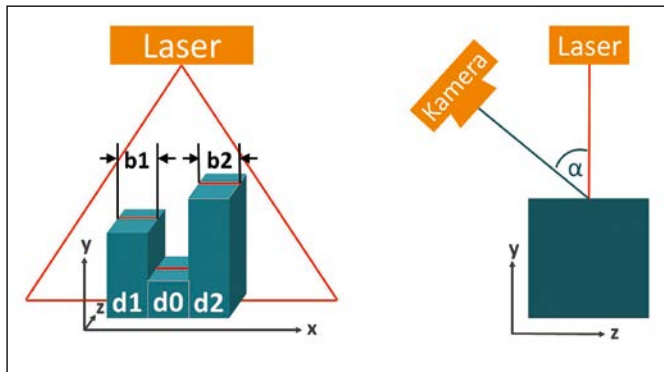


Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Bildauswertung mit Python. Links Vorderansicht, rechts Seitenansicht mit Kamerastellung

Um eine automatische Auswertung der verschiedenen Höhen zu realisieren, muss zuerst eine Aufnahme für eine Kalibrierung für jeden Kamerawinkel erstellt werden. Diese wird mit zwei Messobjekten mit bekannter Höhe und gleichen Breiten aufgenommen. Das niedrigere Messobjekt d_0 wird als Nullpunkt definiert.

Anschließend wird die Breite des Laserstrahls in X-Richtung auf den Oberflächen der Messobjekte gemessen. Auf dem höheren Messobjekt wird der Laserstrahl in der Aufnahme breiter dargestellt. Durch die bekannte Höhe der Messobjekte kann nun für jeden Pixel, den der Laserstrahl breiter ist als beim Nullpunkt-Messobjekt, eine Höhendifferenz zugeordnet werden. Bei der automatisierten Auswertung werden die jeweiligen Breiten des Laserstrahls bestimmt und dadurch die verschiedenen Höhen ermittelt. Es wird dabei auf lediglich eine Messreihe zurückgegriffen, da es sich hierbei nur um eine Konsensprüfung handelt, also ob die Effekte aus der Methode 1 auch hier beobachtet werden können und ob das Verfahren prinzipiell funktionieren kann.

3 Ergebnisse

3.1 Methode 1

Die Kalibrierung ergibt die Funktion $y=0.0001753*x^2+0.2488*x-0.08875$. Mithilfe dieser wird der Versatz (in px) in die Höhendifferenz (in mm) umgerechnet. In jeder Aufnahme werden drei Messobjekte und das Nullpunkt-Objekt aufgenommen. Tabelle 1 zeigt die Messergebnisse und die berechnete Abweichung. Der Mittelwert der Abweichung beträgt 0,35 mm, die Standardabweichung 0,49 mm.

Tabelle 1: Messergebnisse mit Berechnung in Matlab

	Realwert (mm)	Versatz (px)	Auswertung in Matlab (mm)	Abweichung (mm)
M1.2	7	28	7,02	0,02
M1.3	22	84	22,05	0,05
M1.4	15	56	14,39	-0,61
M2.2	33	119	32,00	-1,00
M2.3	19	71	18,46	-0,54
M2.4	3	10	2,42	-0,58
M3.2	27	102	27,11	0,11
M3.3	10	32	8,05	-1,95
M3.4	29	105	27,97	-1,03
M4.2	17	67	17,37	0,37
M4.3	35	128	34,63	-0,37
M4.4	5	21	5,21	0,21
M5.2	6,5	26	6,50	0,00
M5.3	21,5	82	21,49	-0,01
M5.4	18,5	70	18,19	-0,31
M6.2	2,5	10	2,42	-0,08
M6.3	34,5	127	34,34	-0,16
M6.4	14,5	56	14,39	-0,11
M7.2	31	115	30,84	-0,16
M7.3	9	35	8,83	-0,17
M7.4	18,5	70	18,19	-0,31
M8.2	13	51	13,06	0,06
M8.3	26	98	25,98	-0,02
M8.4	8,5	34	8,57	0,07
M9.2	22	86	22,60	0,60
M9.3	1	5	1,16	0,16
M9.4	25	94	24,85	-0,15

3.2 Methode 2

Bei $\alpha=45^\circ$ wird je 1 mm Höhenunterschied eine Veränderung der Laserstrahlbreite um 0,39 px festgestellt. Die Breite des Laserstrahls im Nullpunkt beträgt $b_0 = 192$ px. Mit diesen Werten wird die Messung für zwei Objekte mit den Höhen 46 mm und 121 mm durchgeführt. Die Vermessung des Laserstrahls ergibt folgende Werte:

$$b_1 = 210 \text{ px} \quad b_2 = 239 \text{ px}$$

Zunächst wird der Breitenunterschied Δ des Laserstrahls vom zu messenden Objekt zum Nullpunkt Objekt berechnet:

$$\Delta_1 = b_1 - b_0 = 18 \text{ px} \quad \Delta_2 = b_2 - b_0 = 47 \text{ px}$$

Zuletzt berechnet das Programm die Höhe h wie folgt:

$$h_1 = \Delta_1 / 0,39 = 46,15 \text{ mm}$$

$$h_2 = \Delta_2 / 0,39 = 120,51 \text{ mm}$$

Mit einem Kamerawinkel von $\alpha = 30^\circ$ erhält man bei einer Höhenänderung von 1 mm einen Breitenunterschied der Laserlinie von 0,46 px. Folgende Werte wurden für die Laserlinien gemessen:

$$b_0 = 173 \text{ px} \quad b_1 = 194 \text{ px} \quad b_2 = 229 \text{ px}$$

Daraus ergeben sich folgende Breitenunterschiede zum Nullpunkt:

$$\Delta_1 = b_1 - b_0 = 21 \text{ px} \quad \Delta_2 = b_2 - b_0 = 56 \text{ px}$$

Zuletzt wird die reale Höhe h wie folgt berechnet:

$$h_1 = \Delta_1 / 0,46 = 45,65 \text{ mm}$$

$$h_2 = \Delta_2 / 0,46 = 121,74 \text{ mm}$$

Die letzte Auswertung erfolgt mit $\alpha = 10^\circ$. Die Kalibrierung ergibt einen Breitenunterschied von 0,64 px für 1 mm Höhenunterschied. Die Laserlinien haben folgende Breiten:

$$b_0 = 213 \text{ px} \quad b_1 = 240 \text{ px} \quad b_2 = 292 \text{ px}$$

Daraus ergeben sich folgende Breitenunterschiede zum Nullpunkt:

$$\Delta_1 = b_1 - b_0 = 27 \text{ px} \quad \Delta_2 = b_2 - b_0 = 79 \text{ px}$$

Zuletzt wird die reale Höhe h wie folgt berechnet:

$$h_1 = \Delta_1 / 0,64 = 42,19 \text{ mm}$$

$$h_2 = \Delta_2 / 0,64 = 123,44 \text{ mm}$$

4 Bewertung & Ausblick

Bei den Testergebnissen der Methode 1 sind drei größere Abweichungen von ≥ 1 mm zu erkennen, welche vermutlich auf Ungenauigkeiten im Versuchsaufbau zurückzuführen sind. Werden diese Ausreißer entfernt, beträgt der Mittelwert der Abweichung 0,22 mm und die Standardabweichung 0,28 mm. Es zeigt sich, dass sich prinzipiell eine Multi-Objektmessung mit den gewünschten Genauigkeiten mit diesem Versuchsaufbau realisieren lässt. Mit steigendem lateralen Abstand der Objekte können, je nach geometrischen Verhältnissen, Abschattungen von Teilen der Laserlinie auftreten. In diesem Fall müssen gegebenenfalls mehrere Kameras und Laser eingesetzt werden.

Der Aufbau der Methode 2 zeigt, die Messung der Höhenunterschiede ist mit diesem Aufbau realisierbar. Dabei sind große Unterschiede mit der Veränderung des Kamerawinkels α zu beobachten. Je kleiner der Winkel, desto schwieriger kann die Breite der Laserlinie gemessen werden und desto weiter sind die Messwerte von den realen Werten entfernt. Weitere Schwierigkeiten gibt es bei größeren Höhenunterschieden und mehreren Messobjekten, wenn dies zu Überschneidungen führt. Dadurch wird der Laserstrahl nicht vollständig dargestellt und man erhält nicht die gesamte Breite, was zu einer falschen Höhe führt. Eine weitere Herausforderung stellt die Auflösung des Lasers dar. Auch dies kann zu falschen Messungen der Breite führen.

Für die allgemeine Nutzung des Laserlichtschnittverfahrens zur Multi-Objektmessung ergeben sich viele verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Um eine mögliche spezifische Anwendung zu hinterfragen, werden die während der Versuche identifizierten Möglichkeiten und Einschränkungen aufgezeigt. Wie auch bei Einzelmessungen mit einem (1D-) Lasertriangulationssensor resultieren nicht diffuse Oberflächen, je nach Auftrittswinkel des Lasers, in Spiegelungen und/oder in Laserspeckle. Die Spiegelungen sind bei Multi-Objektmessungen kritisch, da eine Mehrzahl an Objekten Potenzial für Reflexionen bietet. Je nach Stärke des Lasers variiert die Empfindlichkeit des Gesamtsystems gegenüber Veränderungen des Umgebungslichtes. Ein stärkerer Laser reduziert die Empfindlichkeit gegen Umgebungslicht, kann jedoch neben verstärkten Spiegeleffekten zu Schwierigkeiten bei der Speckle-Filterung des Laserstrahls bei Überbelichtung der Kamerapixel führen. Die Farbe der Messobjekte spielt insofern eine Rolle, dass z. B. die Farbe Weiß sehr gut reflektiert, wohingegen Schwarz vermehrt absorbiert. Hochglänzende Metalle sollten nach Möglichkeit vermieden oder Oberflächenbehandelt werden.

Die größten Herausforderungen und Möglichkeiten liegen in der Software, welche die Positionen oder Geometrien der Objekte auswerten soll. Je nach Auswertemethodik

muss beachtet werden, dass die Intensität des Laserstrahls sowie der Laserfokus je nach Abstand zum Messobjekt veränderlich sind, wodurch eine Filterung erschwert wird. Je nach Positionierung des Lasers zu den Messobjekten können Abschattungen vorkommen, welche Reflexionen am Messobjekt teilweise oder ganz verhindern und so eine Messung unmöglich machen. Außerdem können je nach Kamerapositionierung und Triangulationswinkel unterschiedliche Auflösungen und Genauigkeiten resultieren.

Die Identifikation und Separation der Objekte kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. In Tests vor Ort wurden z. B. bekannte ROI (Regions of Interest) definiert, in der sich ein gewisses Objekt aufhält, Pixelreihen Objekten zugeordnet oder Reflexionsflächen nach Reihenfolge im Bild definiert. Analog zu den ausgewerteten Bildern ist es auch möglich Videos auszuwerten und so in real-time, Positionsveränderungen mehrerer Objekte zu erfassen. Bei geeigneten Rahmenbedingungen kann eine Multi-Objektmessung mit dem Laserlichtschnittverfahren, mit ähnlichen Genauigkeiten wie bei 1D-Applikationen, realisiert werden.

Referenzen:

- [1] Michael Sackewitz, 2014 Stuttgart, Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik, Fraunhofer Verlag
- [2] Claus P. Keferstein, Michael Marxer, 2015, Fertigungsmesstechnik – Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, Springer Vieweg Wiesbaden

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



Stefan Ziegler, M.A.

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

st.ziegler@oth-aw.de



Christina Schäfer

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

c.schaefer2@oth-aw.de

In-vitro-Bestimmung der Organdosis in der nuklearmedizinischen Diagnostik mittels Thermolumineszenzdosimetrie

Agnes Pöllmann, M.Sc.¹

Michael Mark, M.Sc.¹

Dr.-Ing. Philipp Ritt²

Prof. Dr. med Torsten Kuwert²

Prof. Dr. Ralf Ringler¹

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

Zusammenfassung

Zur In-vitro-Bestimmung der Organdosis bei einer nuklearmedizinischen Untersuchung soll ein an der OTH Amberg-Weiden entwickeltes Messphantom mit einer geeigneten Methode zur Dosismessung kombiniert werden. Eine vielversprechende Messmethode ist die Thermolumineszenzdosimetrie. Durch die geringe Größe der einzelnen Thermolumineszenzdosimeter (TLD) ist es möglich, diese in einem Raster auf und in den nachgebildeten Organen im Phantom zu positionieren. Da das Phantom sowie die Organnachbildungen mit Wasser gefüllt sind, müssen die TLDs wasserdicht verpackt werden. Bei Vergleichsmessungen soll gezeigt werden, ob das Vakuumverpacken eine geeignete Methode ist, die die Dosismesswerte nicht beeinflusst.

Abstract

For the in vitro determination of the organ dose in a nuclear medicine examination, a measurement phantom developed at the OTH Amberg-Weiden is to be combined with a suitable method for dose measurement. Thermoluminescence dosimetry is a promising measurement method. Due to the small size of the individual thermoluminescence dosimeters (TLD), it is possible to position them in a grid on and in the reproduced organs in the phantom. Since the phantom and the organ replicas are filled with water, the TLDs must be packed watertight. When comparing measurements, it should be shown whether vacuum packing is a suitable method that does not affect the measured dose values.

Einleitung

In der nuklearmedizinischen Diagnostik und Therapie gibt es strenge Vorgaben, die erwirken sollen, dass die Patienten einer möglichst geringen Dosis ausgesetzt sind. So muss die Aktivität zur Behandlung patientenindividuell festgesetzt werden. Zudem wird die Dosis je Untersuchung berechnet, z. B. durch voxelbasierte 3D-Dosimetrie anhand der nuklearmedizinischen Aufnahmen. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk der jeweiligen Organdosis. Um die Berechnung der Organdosis zu verifizieren, sind In-vitro-Messungen am Phantom notwendig. Damit die Ergebnisse aus den Messungen am Phantom so genau wie möglich sind, ist es das Ziel ein möglichst anatomisch korrektes Phantom zu verwenden. Dazu wird die Dosis im gewebeäquivalenten Phantom mit additiv gefertigten Organen mit geeigneten Dosimetern gemessen. Da der Platz im Phantom begrenzt und dieses zusätzlich mit Wasser gefüllt ist, fallen verhältnismäßig große Messsonden so-

wie Messsonden mit permanenter Kabelanbindung weg. Vielversprechend ist deshalb die Thermolumineszenzdosimetrie, wobei es die Schwierigkeit der Wasserdichtigkeit zu meistern gilt.

Material und Methode

Da das Phantom für Messungen mit Wasser gefüllt wird, um in der Bildgebung eine möglichst gute Gewebeäquivalenz zu erzielen, müssen die TLDs wasserdicht verpackt werden. Dabei müssen mehrere Anforderungen erfüllt werden. Die wichtigste ist, dass die Wasserdichtigkeit in jedem Fall gewährleistet wird, zudem muss die Handhabung relativ einfach und die Kosten überschaubar bleiben. Außerdem muss beachtet werden, dass die TLDs zum Auslesen und Ausheizen wieder entpackt werden müssen. Da in der Nuklearmedizin nicht nur Gamma-, sondern auch Betastrahler verwendet werden, sollte zudem wenig bis keine Strahlung durch das Dosimeter-

gehäuse absorbiert werden. Eine sehr einfache und kostengünstige Methode, bei der wenig Material die TLDs umgibt, ist das Vakuumverpacken. Hierzu werden eine handelsübliche Vakuummaschine der Firma Allpax und eine Folie der Stärke 1,7 mm (Oberseite mit Wabenstruktur) und 0,9 mm (glatte Unterseite) verwendet.

In der Praxis hat sich gezeigt, dass einzelne TLDs ausfallen können, deshalb werden als Backup pro Messpunkt jeweils zwei TLDs verwendet. Dazu werden die Dosimeter paarweise in einer Lochmaske aus Karton eingeschweißt (Abbildung 1 rechts).

Für die Messungen stehen 20 MCP N TLDs zur Verfügung, die bereits mehrere Zyklen, bestehend aus Annealing, Bestrahlen, Pre-Annealing und Auslesen, durchlaufen haben, bis sich die gemessenen Dosiswerte stabilisiert haben. Zehn der TLDs werden jeweils in einer festen Matrix auf einem mit Wasser und Tc-99m gefüllten Phantom aus Polycarbonat mit Außenmaßen 20 cm x 20 cm x 3 cm und einer Wandstärke von 0,5 cm mittig positioniert. In der Mitte befindet sich die externe Messsonde des Black Piranha der Firma RTI zur Bestimmung der Dosis. Dies dient als Referenzwert zur Kalibrierung der TLDs.

Um zu vergleichen ob und wenn welchen Einfluss das Vakuumverpacken auf die TLDs hat, werden in einer ersten Messreihe zehn TLDs (A1 bis A10) paarweise vakuumverpackt und weitere zehn TLDs (A11 bis A20) in einer Folgemessung an denselben Positionen, allerdings unverpackt, vermessen.

In einer zweiten Messreihe werden die zehn Dosimeter, die in der ersten Messreihe vakuumverpackt wurden, wiederum an denselben Messpositionen, dieses Mal aber unverpackt, vermessen und umgekehrt.

So wurden insgesamt 16 Messwerte erfasst, jeweils acht Messungen pro TLD in verpacktem und unverpacktem Zustand. Durch diese Vorgehensweise soll zum einen gezeigt werden, ob das Verpacken generell einen Einfluss auf die Messergebnisse hat und im Speziellen den Einfluss auf die Ergebnisse der einzelnen TLDs.

Um die einzelnen Messwerte der beiden Messreihen bei durchwegs unterschiedlichen Aktivitäten vergleichen zu können, werden die TLDs so lange bestrahlt, bis der externe Sensor des Black Piranha ca. 3000 µGy anzeigt. Da der Wert nicht bei jeder Messung exakt erreicht wird, werden die Messwerte bei der Auswertung auf diese 3000 µGy normiert.

Die Aktivität des Tc-99m reicht von 7 GBq bei der ersten Messung bis zu 0,806 GBq bei der letzten Messung.

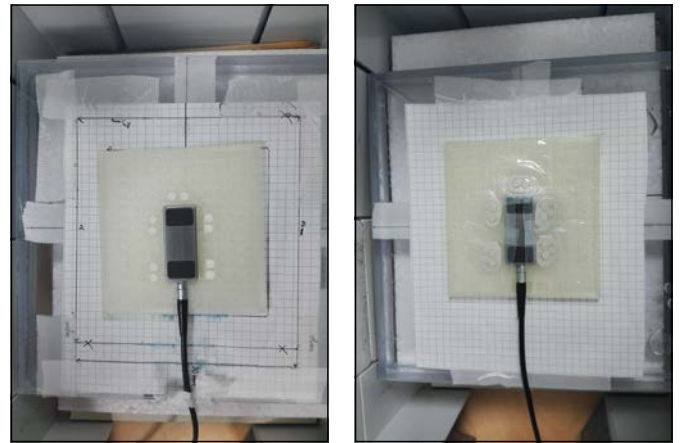


Abbildung 1: Messaufbau mit gefülltem Flächenphantom in einer Bleiburg. Links: Nicht eingeschweißte TLDs umgeben in einer Matrix, die mittig auf dem Phantom positioniert ist, den externen Sensor des Black Piranha. Rechts: Wiederholungsmessung mit paarweise eingeschweißten TLDs an selbiger Position

Messergebnisse

Das Hauptaugenmerk bei der Auswertung der Messergebnisse liegt auf der Fragestellung, ob das Vakuumverpacken Auswirkungen auf die Messergebnisse der TLDs hat. Deshalb werden die Messwerte über den Verlauf der Messungen aufgetragen, wobei die einzelnen Messstage sowie ob das TLD eingeschweißt oder nicht eingeschweißt ist, gekennzeichnet ist.

Betrachtet man die Historie der einzelnen TLDs beider Vergleichsgruppen, zeigt sich, dass die gemessene Dosis bei der Gruppe, die zuerst unverpackt vermessen wurde (A11 bis A20), nach dem ersten Einschweißen einbricht. Die Dosis fällt von durchschnittlich 2726 µGy auf durchschnittlich 2350 µGy. Die TLDs der Gruppe, die zuerst eingeschweißt vermessen wurden (A1 bis A10), weisen bereits bei der ersten Messung eine geringere Dosis von durchschnittlich 2622 µGy auf, der signifikante Sprung in der Dosis fällt in der Folge allerdings weg.

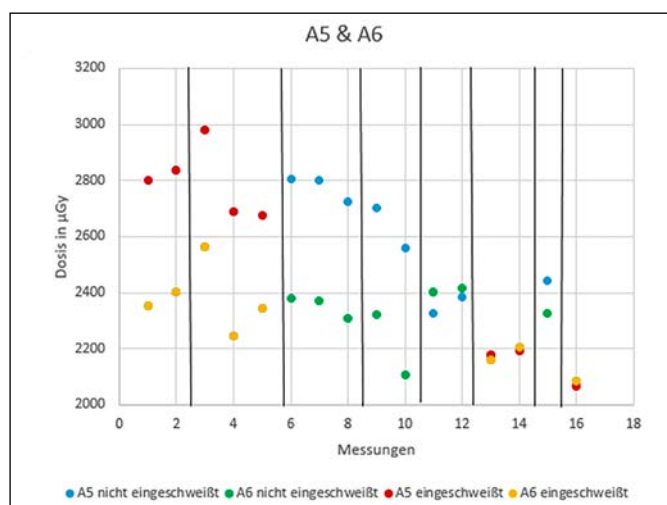
Insgesamt zeigen neun von zehn TLDs der Gruppe A1 bis A10 dieses Verhalten, bei TLD A10 zeigt sich grundsätzlich dasselbe Verhalten, allerdings liegen die Messwerte insgesamt im Bereich von 3000 µGy. In der Gruppe A11 bis A20 zeigen alle zehn TLDs diesen signifikanten Abfall in der Dosis von mindestens 200 µGy, im Durchschnitt liegt er bei 380 µGy.

Außerdem lässt sich bei beiden Vergleichsgruppen eine stärkere Schwankung bei Messungen mit Aktivitäten im Bereich unter 1,5 GBq feststellen.

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Pärchen der beiden Gruppen betrachtet, die jeweils an derselben Position vermessen wurden.

In Abbildung 2 ist zu sehen, dass der Unterschied zwischen der ersten Messung, bei der die beiden TLDs zum ersten Mal eingeschweißt wurden, und der sechsten Messung, bei der die TLDs zum ersten Mal wieder unverpackt vermessen wurden, marginal ist. Während der Messungen, bei denen die TLDs unverpackt sind, fällt die Dosis erst stetig ab und steigt dann wieder sprunghaft an. Diese Schwankungen sind bei allen zehn TLDs dieser Gruppe zu beobachten. Da die Sprünge in gleicher Größenordnung auch zwischen zwei Messungen mit unverpackten TLDs auftreten, lassen sich diese Schwankungen nicht auf das Einschweißen zurückführen.

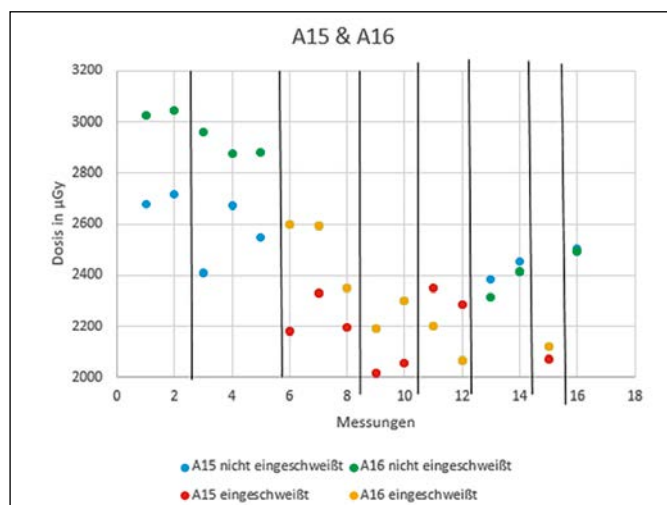
In Abbildung 3 sind zwei Vertreter der Gruppe A11 bis A20 hervorgehoben, die zuerst nicht eingeschweißt und anschließend eingeschweißt vermessen wurden. Hier ist der signifikante Sprung zwischen der letzten Messung in unverpacktem Zustand und der ersten Messung mit eingeschweißten TLDs deutlich zu erkennen. Bei TLD A15 liegt die Differenz bei 365 µGy und bei A16 bei 279 µGy. Auch zwischen den Messungen Nr. 14 und Nr. 15 lässt sich ein Abfall der Dosis ausmachen, dieser ist allerdings hier und auch bei allen anderen TLDs dieser Gruppe um ca. 20% geringer als zwischen den Messungen Nr. 5 und Nr. 6. Zudem zeigt das TLD A15 auch Sprünge in dieser Größenordnung zwischen Messungen, bei denen es jeweils nicht eingeschweißt bzw. eingeschweißt vermessen wurde.



Messung	Aktivität in GBq
1	6,8
2	5,1
3	5,25
4	3,78
5	2,66
6	4,7
7	3,37
8	2,34

Messung	Aktivität in GBq
9	3,66
10	2,57
11	1,734
12	1,19
13	1,14
14	0,74
15	1,04
16	0,655

Abbildung 2: Ergebnisse der Dosismessungen zweier TLDs die wiederholt eingeschweißt und nicht eingeschweißt vermessen wurden. Die Farben blau und grün stehen für die Messungen mit unverpackten TLDs, die Farben rot und gelb für die Messungen mit eingeschweißten TLDs. Die schwarzen vertikalen Linien kennzeichnen die Messtage. In der Tabelle ist die im Phantom vorhandene Aktivität je Messung aufgelistet. Die Zeit der Bestrahlung wurde entsprechend der gemessenen Dosisrate angepasst, um jeweils die gleiche Dosis zu erhalten.



Messung	Aktivität in GBq
1	7
2	5,25
3	5,422
4	3,95
5	2,82
6	4,53
7	3,2
8	2,17

Messung	Aktivität in GBq
9	3,49
10	2,41
11	1,57
12	1
13	1,3
14	0,934
15	0,885
16	0,806

Abbildung 3: Ergebnisse der Dosismessungen zweier TLDs die wiederholt eingeschweißt und nicht eingeschweißt vermessen wurden. Die Farben blau und grün stehen für die Messungen mit unverpackten TLDs, die Farben rot und gelb für die Messungen mit eingeschweißten TLDs. Die schwarzen vertikalen Linien kennzeichnen die Messtage. In der Tabelle ist die im Phantom vorhandene Aktivität je Messung aufgelistet. Die Zeit der Bestrahlung wurde entsprechend der gemessenen Dosisrate angepasst, um jeweils die gleiche Dosis zu erhalten.

Fazit

Der Dosisabfall nach dem Einschweißen lässt darauf schließen, dass das Einschweißen die TLDs durch den mechanischen Druck verändert. Da dieser Abfall nicht nach jedem Einschweißvorgang und bei der Vergleichsgruppe mit den zuerst eingeschweißten TLDs schwer von den Schwankungen zwischen den einzelnen Messungen zu unterscheiden ist, ist davon auszugehen, dass der Effekt einmalig ist.

Bei Aktivitäten unter 1,5 GBq liegt die Dosisrate im Bereich unterhalb von ca. 0,85 $\mu\text{Gy/s}$. Die Schwankungen können daher kommen, dass die TLDs mit ihrer geringen Größe im Vergleich zur größeren Detektorfläche des Piranha verhältnismäßig weniger Strahlung detektieren können. Da der externe Sensor des Black Piranha in einem Dosisratenbereich von 1 nGy /s bis 76 mGy/s verwendet werden kann, kann ein Messfehler durch diesen Sensor nahezu ausgeschlossen werden.

Ausblick

In einer weiteren Messreihe sollen die bisherigen Messungen wiederholt werden. Außerdem werden die Messungen zusätzlich mit TLDs durchgeführt, die bisher noch nicht eingeschweißt wurden. So soll verifiziert werden,

ob die Schlussfolgerung, dass durch das Einschweißen ein einmaliger mechanischer Effekt auftritt, korrekt ist. Dazu werden die zusätzlichen TLDs wiederum in Gruppen unterteilt, wobei eine Gruppe durchwegs unverpackt vermessen wird.

Um den Schwankungen im unteren Aktivitätsbereich auf den Grund zu gehen, wird neben den Wiederholungsmessungen und zusätzlichen Messungen in genau diesem Bereich eine Simulation mit Gamos durchgeführt werden. Dabei soll die Ausbeute der beiden unterschiedlichen Detektoren ins Auge gefasst werden. Während der externe Sensor des Black Piranha eine wesentlich größere Detektorfläche (1 cm x 1 cm) besitzt als die TLDs (Durchmesser 5 mm, Dicke 0,9 mm), ist dessen Sichtfenster seitlich abgeschirmt. Die TLDs wiederum besitzen zwar eine deutlich kleinere Detektorfläche, können aber die Strahlung aus allen Richtungen erfassen.

Referenzen:

- [1] H. Kraus. Entwicklung und Realisierung eines gewebeäquivalenten Body-Phantoms mittels 3D-Druck-Verfahren für die Dosimetrie in der Nuklearmedizin, Forschungsbericht Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, 2021.
- [2] „Strahlenschutz in der Medizin“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, <https://www.bmu.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/strahlenschutz/ionisierende-strahlung/strahlenschutz-in-der-medizin>, letzter Zugriff 07.09.2021
- [3] „Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung“, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, <https://www.gesetze-im-internet.de/strlsg/>, letzter Zugriff 07.09.2021
- [4] Th. Götz et al., A comparison of methods for adapting dose-voxel-kernels to tissue inhomogeneities, Phys Med Biol, 2019

Projektpartner:

Nuklearmedizinische Klinik, Universitätsklinikum Erlangen, Erlangen

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



Agnes Pöllmann, M.Sc.

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

a.poellmann@oth-aw.de



Michael Mark, M.Sc.

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

m.mark@oth-aw.de

SGW

STADTBAU
WEIDEN GMBH



Gp-2.com

ZUHAUSE IN WEIDEN

Leibnizstraße 4 | 92637 Weiden | Tel.: 0961 389 04 - 0 | www.sgw-weiden.de

KARRIERE-ROCKER



OTH PROFESSIONAL

Berufsbegleitende Weiterbildung
auf Hochschulniveau

Studium // Kurse // Zertifikate

Jetzt weiterkommen unter
oth-professional.de



DEINE HOCHSCHULE

#BESSERSTUDIERN

Jetzt informieren!

oth-aw.de/besserstudieren



AM-LadePole

private

Das Komplettpaket für das
E-Laden zu Hause.

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



© Kerstin Gajda - Stadtwerke Amberg

Ansprechpartner:

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



STADTWERKE AMBERG
STROM GAS WÄRME WASSER BÄDER

Bestimmung der Form- und Größenunterschiede des Femurs anhand von segmentierten CT-Datensätzen zur patientenspezifischen Planung einer Hüfttotalendoprothese unter Berücksichtigung biomechanischer Aspekte

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

Zusammenfassung

Die biomechanische Funktionalität von künstlichen Hüften steht in engem Zusammenhang mit der Lebensqualität von Patienten nach der Implantation einer Hüfttotalendoprothese. Da die Zahl der Hüfttotalendoprothesen aufgrund der steigenden Lebenserwartung zunimmt, ist die biomechanische Forschung für die Verbesserung der verwendeten Implantate und der angewandten Operationsverfahren von großer Bedeutung. Die Mehrkörpersimulation wird zur Vorhersage von Kräften und Momenten im menschlichen Körper verwendet. In der Regel wird eine generische Skalierung vorgenommen, um die in der Mehrkörpersimulation verwendeten Menschmodelle an den einzelnen Patienten anzupassen. Da Form und Größe der Knochen jedoch stark variieren können, ist diese Art der Skalierung oft nicht ausreichend. In dieser Arbeit wurden verschiedene CT-Datensätze verwendet, um die Unterschiede der individuellen Oberschenkelformen zu quantifizieren, insbesondere im Hinblick auf wichtige biomechanische Hüftparameter wie den CCD-Winkel oder das Femur-Offset. Unsere Ergebnisse belegen, dass Mehrkörpersimulationen patientenspezifischer modelliert werden sollten, um Gelenkkräfte und -momente genauer berechnen zu können und damit die Operationsplanung zu verbessern.

Abstract

The increasing number of total hip arthroplasty occurs due to demographic change in society. Biomechanical research to improve total hip arthroplasty planning is important, due to the fact that the biomechanical functionality of the hip joint is closely related to the quality of life of a patient after THA. Multibody simulation is used for estimating forces and moments occurring in human body during activities of daily living like walking or running. Usually, multibody simulation models are only adapted to the size and anthropometry of the patient (generically scaling). Since human anatomy (e.g. femur size and shape) varies widely, generic determination of muscle forces and moments may be inadequate. Therefore, in this study, different biomechanical parameters (e.g. CCD-angle or femoral offset) are compared using CT data sets to quantify the individuality of the human body. The results demonstrate the relevance of patient-specific modelling before revision total hip arthroplasty in order to better consider the patient's biomechanics and therefore provide better clinical outcomes of the patient after revision total hip arthroplasty.

1 Einleitung

Aufgrund des demografischen Wandels im Sinne einer immer älter werdenden Bevölkerung steigt die Zahl der Inzidenzen von Arthrose, insbesondere an der Hüfte, und damit auch die Zahl der Hüfttotalendoprothesen (HTEP) [1]. Die Implantation einer HTEP sichert die Mobilität der Patienten und erhöht somit ihre Lebensqualität [2].

Obwohl die Implantation einer HTEP mit einer Überlebensrate von bis zu 95 % nach zehn Jahren bei Patienten über 75 Jahren als eine der erfolgreichsten Operationen des 20. Jahrhunderts bezeichnet wurde, ist in naher Zukunft mit einer steigenden Zahl von Revisionseingriffen zu rechnen [3, 4].

Nach einer Revisions-HTEP ist im Vergleich zur primären HTEP die Schmerzlinderung des Patienten geringer sowie

die Funktionswiederherstellung des Gelenks nicht vollständig gewährleistet [5,6].

Daher ist eine sorgfältige Planung der hüftchirurgischen Parameter, wie z. B. des femoralen Centrums-Collum-Diaphysen-Winkels (CCD) oder der Anteversion der Hüftpfanne, von großer Bedeutung, um die Funktionalität im Falle einer Revisions-HTEP sicherzustellen. Gelenkkräfte und -momente sowie andere wichtige biomechanische Faktoren werden bei der HTEP-Planung jedoch nicht ausreichend berücksichtigt.

Die Mehrkörpersimulation (MKS) ist für die korrekte Abschätzung dieser Parameter und damit für die Verbesserung der chirurgischen Planung unerlässlich. MKS ermöglichen die Simulation von Kräften, Momenten und Muskelaktivitäten, um wichtige Informationen über die menschliche Biomechanik zu gewinnen [7, 8].

Modelle des menschlichen Körpers, die aus starren Körpern (Knochen), Muskeln und Gelenken bestehen, werden meist für die MKS verwendet. Um diese Modelle individuell an den Patienten anpassen zu können, können Größe und Gewicht eingestellt werden. Diese Anpassungen beruhen in der Regel auf einer generischen Skalierung.

Dabei gehen jedoch meist wichtige patientenspezifische Informationen verloren oder werden nicht korrekt simuliert. Ziel dieser Arbeit ist es, die individuellen Unterschiede wichtiger Landmarken des Oberschenkelknochens für die biomechanische Simulation zu quantifizieren, um die Bedeutung einer individualisierten Anpassung dieser Landmarken an menschliche Modelle zu demonstrieren. Durch die Anpassung der Modelle an die individuelle Physiologie des Oberschenkelknochens ändern sich die Muskelansatzpunkte des MKS-Modells und damit auch die berechneten Kräfte und Momente des Hüftgelenks [9].

2 Material und Methoden

Für diese Studie wurden sieben CT-Datensätze untersucht. Dazu wurden die DICOM-Bilder in Materialise Mimics Research (Materialise NV, Leuven, Belgien) importiert (Abbildung 1 (a)). Zunächst wurden wichtige geometrische Parameter mit Einfluss auf die biomechanische Funktion wie der CCD-Winkel oder das femorale Offset bestimmt. Zweitens wurden die knöchernen Strukturen der CT-Daten segmentiert. Dann wurde der Oberschenkelknochen vom Becken getrennt (Abbildung 1 (b)) und eine 3D-Rekonstruktion des Oberschenkelknochens durchgeführt (Abbildung 1 (c)). Für das 3D-Femurmodell wurden vier verschiedene Landmarken gesetzt: das femorale Rotationszentrum (FRZ), der proximale posteriore Trochanterpunkt (PPTP), der posteriore Femurkopfpunkt (PFKP) und der anteriore Femurkopfpunkt (AFKP). Anschließend

wurden die Abstände zwischen dem FRZ und dem PPTP (d-FRZ-PPTP) sowie dem PFKP und dem AFKP (d-PFKP-AFKP) gemessen.

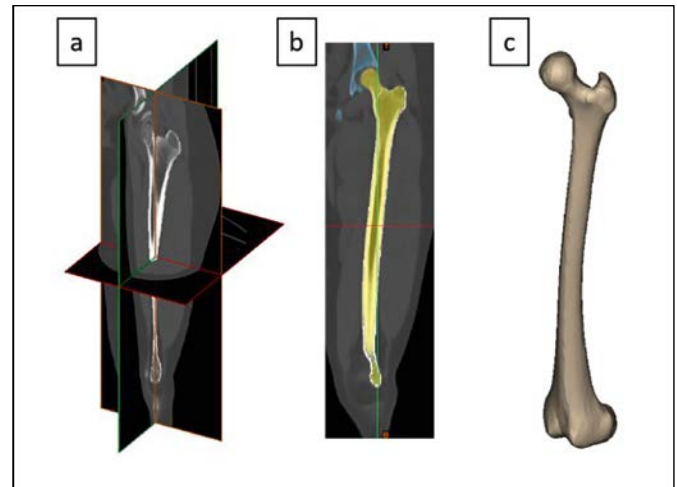


Abbildung 1: Segmentierungsworkflow: a) Importierte DICOM-Dateien des CT-Scans; b) Markierung der knöchernen Strukturen, sowie Unterscheidung von Becken (blau) und Oberschenkel (gelb); c) 3D-Rekonstruktion des Oberschenkels.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen des CCD-Winkels und des femoralen Offsets sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der minimale gemessene CCD-Winkel lag bei 118,3° und der maximale Winkel bei 139,5°. Der Mittelwert der Messungen ergab einen CCD-Winkel von 130,1° ±7,2.

Das femorale Offset wies ebenfalls signifikant unterschiedliche Werte auf. Das niedrigste femorale Offset betrug 29,7 mm und das höchste 46,8 mm. Das mittlere femorale Offset betrug 37,8 mm ±6,8 für die sieben Patienten.

Der minimale Abstand des d-FRZ-PPTP betrug 42,7 mm und der maximale 56,7 mm. Der Mittelwert lag bei 51,0 mm ±4,4. Die Abstände für d-PFKP-AFKP waren 34,0 mm (Minimum), 49,9 mm (Maximum) mit einem Mittelwert von 43,9 mm ±5,2.

Tabelle 1: Minimal-, Maximal- und Mittelwerte des CCD-Winkels und des femoralen Offsets für die sieben Patienten.

	Minimum	Maximum	Mittelwert (± SD)
CCD-Winkel [°]	118,3	139,5	130,1 (±7,2)
Offset [mm]	29,7	46,8	37,8 (±6,8)
d-FRZ-PPTP [mm]	42,7	56,7	51,0 (±4,4)
d-PFKP-AFKP [mm]	34,0	49,4	43,9 (±5,2)

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen große Unterschiede für alle gemessenen Parameter. Würden diese unterschiedlichen Formen und Größen des Oberschenkelknochens in der MKS patientenspezifisch berücksichtigt, würden sich die Muskel- und Sehnenansatzpunkte verändern und somit zu präziseren Momenten und Kräften des Hüftgelenks führen. Infolgedessen könnten realistischere Ergebnisse der MKS zu einem besseren Verständnis der Hüftbiomechanik führen und somit zu einer besseren chirurgischen Planung der HTEP beitragen.

5 Fazit

Die großen Unterschiede in Form und Größe der Knochen und die Notwendigkeit einer patientenspezifischen Modellierung wurden auch in anderen Studien aufgezeigt [10]. Unterschiede in Größe und Form des Oberschenkelknochens führen zu Veränderungen der Sehnen- und Muskelansatzpunkte und damit zu präziseren Ergebnissen bei der MKS.

Referenzen:

- [1] Pabinger C, Geissler A. Utilization rates of hip arthroplasty in OECD countries. *Osteoarthritis Cartilage*. 2014 Jun;22(6):734-41.
- [2] Mariconda M, Galasso O, Costa GG, Recano P, Cerbasi S. Quality of life and functionality after total hip arthroplasty: a long-term follow-up study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2011;12:222. Published 2011 Oct 6.
- [3] Learmonth ID, Young C, Rorabeck C. The operation of the century: total hip replacement. *Lancet*. 2007 Oct 27;370(9597):1508-19. Review.
- [4] Rajaei SS, Campbell JC, Mirocha J, Paiement GD. Increasing Burden of Total Hip Arthroplasty Revisions in Patients Between 45 and 64 Years of Age. *J Bone Joint Surg Am*. 2018 Mar 21;100(6):449-458.
- [5] Evans JT, Evans JP, Walker RW, Blom AW, Whitehouse MR, Sayers A. How long does a hip replacement last? A systematic review and meta-analysis of case series and national registry reports with more than 15 years of follow-up. *Lancet*. 2019;393(10172):647-654.
- [6] Vanhegan IS, Malik AK, Jayakumar P, Ul Islam S, Haddad FS. A financial analysis of revision hip arthroplasty: the economic burden in relation to the national tariff. *Bone Joint J*. 2012;94:619-623.
- [7] Miehl J., Forst R., Wartzack S., Sesselmann S.: Biomechanischer Simulator zur prä-operativen Abschätzung und Optimierung der post-operativen Muskelfunktion am Beispiel der Revisionsendoprothetik des Hüftgelenks. Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU2016, Berlin, 25. Oktober 2016 – 28. Oktober 2016)
- [8] Sesselmann, S., Miehl J., Wartzack, S. & Forst, R. (2016). Enhancement of Surgical Planning through Patient-Specific Biomechanical Modeling and Simulation. – 37th SICOT Orthopaedic World Congress – Rome 2016.
- [9] Scherb, D., Wolf, A., Fleischmann, C., Sesselmann, S., Wartzack, S., Miehl J.: Conceptual Approach to estimate the musculoskeletal follow-ups of endoprosthetic hip replacements. CAMS-Knee OpenSim Workshop – Zürich 2020.
- [10] Tkany L., Hofstätter B., Petersik A., Miehl J., Wartzack S., Sesselmann S.: A new design process for anatomically enhanced osteosynthesis plates. *Journal of Orthopaedic Research* (2019)

Kontakt:



Christopher Fleischmann, M.Sc.

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

c.fleischmann@oth-aw.de



Irina Leher, B.Eng.

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

i.leher@oth-aw.de



David Scherb, M.Sc.

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

scherb@mfk.fau.de



Alexander Wolf, M.Sc.

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

a.wolf@mfk.fau.de



Dr.-Ing. Jörg Miehling

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

miehling@mfk.fau.de



Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

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

wartzack@mfk.fau.de



Prof. Dr. med. habil. Stefan Sesselmann

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

s.sesselmann@oth-aw.de

Zusammenfassung

Schwermetalle sind lebensnotwendige Spurenelemente, aber auch Schadstoffe am Arbeitsplatz, in der Umwelt und in Bedarfsgegenständen des täglichen Lebens. Instrumentell-analytische Methoden liefern praktische Antworten zur Gefährdungslage. Am Beispiel des Arsens beleuchtet dieser Artikel, wie sich Einschätzungen über Gesundheitsrisiken im Lauf zweier Jahrhunderte ins Gegenteil verkehren können.

Abstract

Heavy metals are vital trace elements, but also pollutants at the workplace, in the environment and in everyday consumer goods. Instrumental analytical methods provide practical answers to the hazard situation. Using arsenic as an example, this article illustrates how assessments of health risks can be reversed over the course of two centuries.

Schwermetallanalytik im Boden

„Kontaminiertes Material bremst den Bau der neuen Kunstrasenplätze“ [1], titelte eine Schlagzeile im Juli 2021. Arsen auf dem Sportplatz – Umweltverschmutzung oder etwa ganz natürlich?

Das chemische Element Arsen kommt seit der Entstehung der Erde verbreitet vor, selten gediegen, oftmals als Begleiter von Schwefel, als gelbes Auripigment As_2S_3 , rauschroter Realgar As_4S_4 , glänzender Arsenkies $\text{FeAs}_2 \cdot \text{FeS}_2$, als Löllingit FeAs_2 und in vielfältigen Metallerzen. Schon die Alchemisten kannten Arsenminerale. Heute wird Arsen für Hartmetalle und Halbleiter technisch genutzt. Arsenhaltige Farben, Medikamente und Pestizide sind verboten. Seit einigen Jahren gelten strenge Anwendungsbeschränkungen für Glas, Leder, Pelze, Textilien, Beiz- und Reinigungsmittel, Sprengstoffe, Metallkleber, die Oberflächen-, Bauholz- und Wasserbehandlung. Arsen und seine Verbindungen gelten als giftig und krebserzeugend und unterliegen der Gefahrstoffverordnung.

Als Beimengung eines aus natürlichen Lagern abgebauten Rohstoffs können Arsenverunreinigungen geologischer Herkunft tatsächlich in Baumaterialien ge-

langen. Arsentrioxid As_2O_3 fällt technisch im Flugstaub von Erzröstoffbetrieben an, es löst sich in Wasser zögerlich zur sehr schwachen Arsenigen Säure H_3AsO_3 . In alkalischer Lösung bilden sich Arsenite $[\text{AsO}_3]^{3-}$, die durch Wasserstoffperoxid oder Salpetersäure zum Arsenat(V) $[\text{AsO}_4]^{3-}$ oxidiert werden. Arsenbelastungen in Böden und Trinkwasser sind nicht ungewöhnlich. Die Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV) gibt als Prüfwert für Baugrundstücke, Nutzflächen und Gärten 50 Milligramm Arsen pro Kilogramm trockenem Boden vor [2]. In Park- und Freizeitanlagen sind 125 mg/kg zulässig.

Im Chemielabor wird die Bodenprobe mit Säuren aufgeschlossen und der Arsengehalt spektroskopisch bestimmt. Abbildung 1 zeigt die 6000 bis 8000 K heiße Plasmafackel eines ICP-OES-Gerätes, in der Arsenverbindungen in die Atome zerfallen, Elektronen abgeben und charakteristische Lichtwellen ausstrahlen, deren Intensität die Konzentration der vorhandenen Elemente anzeigt. Chemische Analysenberichte berechnen das Ergebnis für das Element Arsen, jedoch liegen in Gesteinen und Böden immer Verbindungen vor. Denn elementares Arsen ist sehr reaktiv und verbindet sich mit Sauerstoff, Schwefel und Metallen, ohne dass es jemals von der Erde verschwindet.

Aus komplizierten Proben wie Klärschlamm und Lebensmitteln wird der nach Knoblauch riechende Arsenwasserstoff AsH_3 ausgetrieben und mit der Hydridgastechnik (HG-AAS) atomspektroskopisch quantifiziert. Der englische Militär- und Gerichtschemiker James Marsh hat diesen Arsennachweis 1836 durch Umsetzung von Mageninhalt und Leichenteilen mit Wasserstoff erfunden. Der Giftmord mit arsenikhaltigen Insektiziden und Mäusebutter war einstmal – man darf sagen – populär.

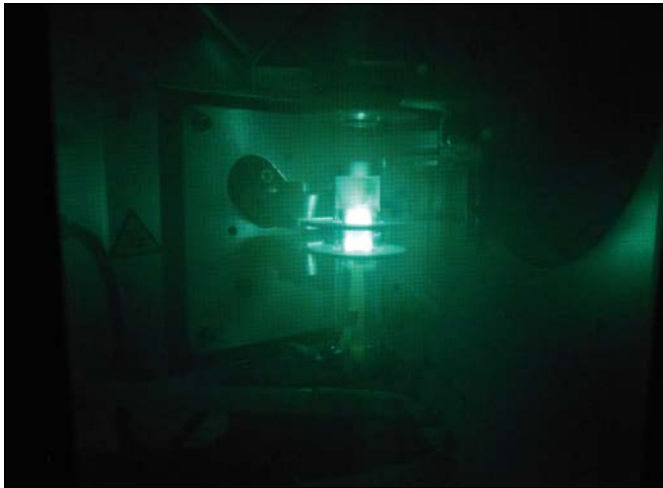


Abbildung 1: Argonplasma eines Emissionsspektrometers (ICP-OES) im Labor Umweltanalytik

Weinbau, Kunst und Medizin

Solange Arsen [3] sich ungelöst im Boden befindet, besteht eine sehr geringe Gesundheitsgefahr. Allein durch das Einatmen von Stäuben und Verschlucken von Arsenverbindungen kann Arsen ungewollt in den menschlichen Körper gelangen und eine akute oder chronische Vergiftung auslösen.

Im Grundwasser aus arsenhaltigen Böden liegen die Ionen der Arsenigen Säure vor, was die Trinkwasseraufbereitung vor Probleme stellen kann. Angst vor Vergiftung durch das Trinkwasser ist jedoch nicht angebracht: Die Wasserversorger achten unter amtlicher Aufsicht peinlichst auf die Einhaltung der Grenzwerte, zehn Millionstel Gramm im Liter (0,01 mg/L). Wasser ist das sicherste Lebensmittel in Deutschland.

Kupferacetatarсенit $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{AsO}_2)_2$, das epochale Schweinfurter Grün, war von 1814 bis zum Verbot 1882 der angesagte Farbstoff für Tapeten, Wände und Textilien. Das frische Grün bereicherte auch die helle Farbpalette der Impressionisten (Abbildung 2). Gefährlich für Kunstliebhaber und Restauratoren: Der Pilz *Penicillium brevicaulis* setzt aus dem leimgebundenen Pigment flüchtige organische Arsenverbindungen in die Atemluft frei. Das Grünpigment wurde in Deutschland bis 1942 als Insektizid im Weinbau verwendet, als Bootanstrich gegen Algenbewuchs sogar noch länger.

„Es ist die Dosis, die das Gift macht“, begriff Paracelsus, der mittelalterliche Arzt. Arsen ist ein für das Wachstum lebensnotwendiges Ultrapurenelement. Der menschliche Körper kann sogar chronisch erhöhte Arsendosen über eine gewisse Zeit verkraften, was Rosstäuscher, Arsenesser und Mörder bis ins 20. Jahrhundert zu nutzen wussten. Arsen fand sich im Haar der Gletscherleiche „Ötzi“, der 3000 v. Chr. vermutlich mit arsenhaltigen Kupfererzen hantierte. In Napoleons Leiche im Sarkophag des Pariser Invalidendoms mag Arsen auf posthume Konservierungsmittel zurückgehen. Der Feldherr hat aber auch die im 19. Jahrhundert schicke Fowler’sche Lösung aus Kaliumarsenit in Lavendelwasser genossen, die damals als Fiebersenker, Aphrodisiakum und Mittel gegen Schuppenflechte galt.

Die Schulmedizin hat längst Abstand von Arsenarzneien genommen: Robert Koch bekämpfte die Schlafkrankheit mit dem giftigen Natriumsalz der *p*-Aminobenzolarsensäure. Und Paul Ehrlich behandelte 1910 die Syphilis mit Salvarsan, dessen Molekül auf dem alten 200-Mark-Schein chemisch richtig dargestellt ist (Abbildung 3). Zweifelhafte Stärkungsmittel für Nutztiere und arsenhaltige Pestizide in Importobst spielen im heutigen Europa keine Rolle mehr. Allenfalls Esoterische schwören auf Arsenit in zeitgeistigen Schüßler-Salzen.

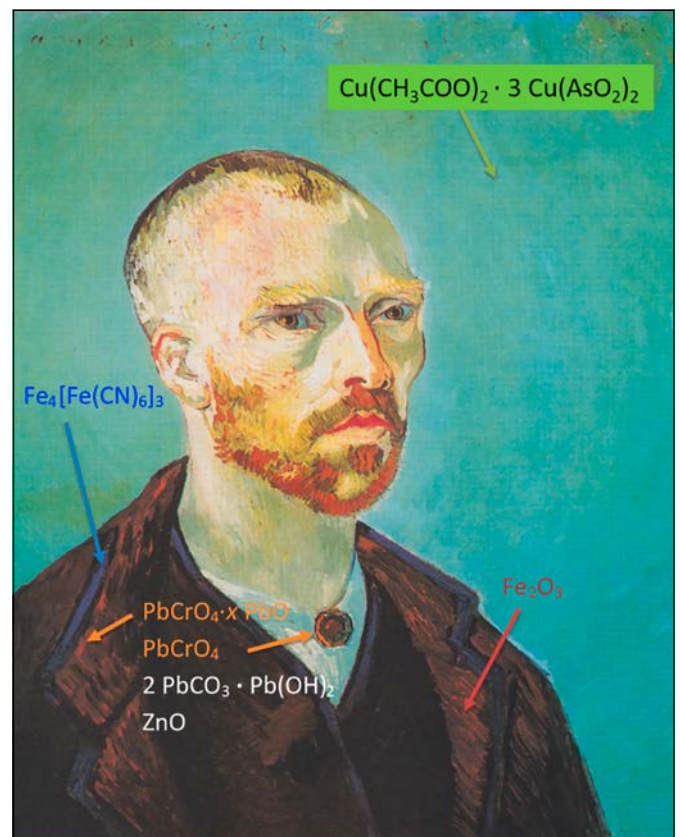


Abbildung 2: Farbzusammensetzung in Vincent van Goghs Selbstportrait: Bleiweiß, Zinkweiß, Schweinfurter Grün, Berliner Blau, Chromorange, Chromgelb, roter Ocker. Modifiziert nach [5].



Abbildung 3: Paul Ehrlich und Salvarsan auf dem 200-DM-Schein von 1989. Ausschnitt [6].

Makaberer Ausklang

Etwa 100 mg Arsen trioxid töten einen Menschen. Bei akuter Vergiftung setzen Schluckstörungen, Brechreiz, Erbrechen und Gastroenteritis ein. Auf reiswasserähnlichen Durchfall und brennende Bauchkrämpfe folgen Nieren- und Leberversagen. Wasser-, Elektrolyt- und Eiweißverlust führen in einen Schockzustand. Der Blutdruck fällt ab, der Kreislauf kollabiert. Rechtzeitige Erste Hilfe mit Komplexbildnern wie Dimercaptopropansulfonat (DMPS) ist möglich.

Arsenverbindungen werden über den Magen-Darm-Trakt und die Lungen aufgenommen, mit dem Blut schnell verteilt und in Leber, Niere, Milz, Dünndarm, Lunge sowie langfristig in Haaren und Nägeln angereichert. Bei chronischer Vergiftung treten Hautveränderungen, Haarausfall, weiße Querstreifen in den Fingernägeln und der „Arsenschnupfen“ auf, begleitet von allgemeiner Schwäche.

Arsen blockiert die schwefelhaltigen Seitengruppen von Proteinen und Enzymen wie der Pyruvatdehydrogenase; es schädigt Blutkapillaren, Haut und Nervensystem. Arsen(V) wird im Körper zu Arsen(III) reduziert. Über Methylarsonsäure $(\text{CH}_3)\text{As}^{\text{V}}\text{O}(\text{OH})_2$ und die sehr giftige Methylarsonigsäure $\text{CH}_3\text{As}^{\text{III}}(\text{OH})_2$ endet die Entgiftung beim Menschen bei der Dimethylarsinsäure $(\text{CH}_3)_2\text{As}^{\text{V}}\text{O}(\text{OH})$. Letztere, auch Kakodylsäure genannt, und ihr Natriumsalz wurden als „Agent Blue“-Herbizide im Vietnamkrieg zur Vernichtung von Reiskulturen eingesetzt. Blaukreuz-Kampfstoffe (Clark, Adamsit), die die oberen Luftwege schädigen, und das Gelbkreuz-Hautgift Chlorvinylarsindichlorid (Lewisit) markieren beschämende Höhepunkte der internationalen Arsenchemie im Ersten und Zweiten Weltkrieg.

Leber- und Bronchialkrebs trat früher gehäuft bei Winzern auf. Arsen wirkt zytotoxisch, mutagen und teratogen, das heißt: auf lange Sicht sterben Zellen ab, bösartige Tumore wuchern und das werdende Kind im Mutterleib erleidet Missbildungen. Calciumarsenat $\text{Ca}_3[\text{AsO}_4]_2$, Arsensäure H_3AsO_4 , Bleiarsenat $\text{Pb}_3[\text{AsO}_4]_2$, Bleihydrogenarsenat PbHAsO_4 , Triethylarsenat $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{AsO}_4$, Arsen trioxid As_2O_3 und Arsen pentaoxid As_2O_5 haben wir aus unseren Chemielabors seit zwei Jahrhunderten verbannt. Unsere nachforschende Analytik heute gilt Arsen in Bedarfsgegenständen, Loten und technischen Betriebsstoffen.

Ja, das war ein Einblick in die Chemie im Studiengang Umwelttechnik.

Referenzen:

- [1] M. Schecklmann, Baustopp bei der SpVgg SV Weiden: Verein gerät in Platznot, Oberpfalz Medien, 20.07.2021, www.onetz.de/oberpfalz/weiden-oberpfalz/baustopp-spvgg-sv-weiden-verein-geraet-platznot-id3280809.html
- [2] Bundes-Bodenschutz- und Altlasterverordnung, Anhang 2, BGBL I 1999, 1575-1579, www.gesetze-im-internet.de/bbodschv/anhang_2.html
- [3] P. Kurzweil, Toxikologie und Gefahrstoffe: Gifte, Wirkungen, Arbeitssicherheit, Verlag Europa Lehrmittel, Haan 2013.
- [4] V. Jirat-Wasiutynski, Vincent van Gogh's Self-Portrait Dedicated to Paul Gauguin: An Historical and Technical Study, Harvard University Art Museums, Cambridge, Mass. 1984, S. 31. Abruf 14.08.2021. www.swisseduc.ch/chemie/pigmente/gemaelde/gogh_selbst.html
- [5] Bildnachweis: Gemeinfrei, Abruf 14.08.2021. [de.wikipedia.org/wiki/Datei:Van_Gogh_Selbstbildnis_\(Paul_Gauguin_gewidmet\).jpeg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Van_Gogh_Selbstbildnis_(Paul_Gauguin_gewidmet).jpeg)
- [6] Bildnachweis: Deutsche Bundesbank, Frankfurt am Main, Abruf 14.08.2021. www.bundesbank.de/de/aufgaben/bargeld/dm-banknoten-und-muenzen/-/dm-banknoten-599482

Projektpartner:

Regionale und überregionale Firmen.

University of West Bohemia, CZ-Pilsen, im Rahmen des UMTRIS-Projektes (Untersuchung nachhaltiger Trafoöle).

Fördergeber:



Kontakt:



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Kanwan: Chemische Analyse eines essbaren Steins aus Kamerun

Christian H. Pevoubou Kaffo
Josef Schottenbauer, M.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell
Susanne Bradfish, CTA
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Zusammenfassung

Ein carbonathaltiges Mineral wird in einer Region in Kamerun zum Kochen verwendet. Als Begleiterscheinung treten unklare Hautausschläge auf. Wir haben die chemische Zusammensetzung des Minerals analysiert.

Abstract

A mineral containing carbonate is used for cooking in a region in Cameroon. As an accompanying symptom, unclear skin rashes occur. We have analyzed the chemical composition of the mineral.

Von der Spezialität zur Analyse

Die Republik Kamerun liegt am Golf von Guinea in Zentralafrika [1]. In der ehemaligen Kolonie des Deutschen Kaiserreiches (1884-1916) gelten heute die Amtssprachen Französisch und Englisch neben vielfältigen Stammessprachen und regionalen Dialekten. Der Name der Hauptstadt Yaoundé soll sich von „Ja zu Deutschland“ herleiten. Im fruchtbaren Süden wechseln sich tropische Regenwälder, flache Küstenregionen und grüne Hochebenen ab. Das Vulkanmassiv des Kamerunberges ist die höchste Erhebung Westafrikas. Im Norden streckt sich eine heiß-kalte Trockensavanne bis zum Tschadsee hin. Der Anbau von Kaffee, Kakao, Bananen, Ölpalmen, Getreide und Maniok prägen die Wirtschaft des Landes. Seit einigen Jahrzehnten wird vor der Küste Erdöl gefördert.

Kanwan – mit französischen Nasallauten gesprochen – ist ein Mineral, das im Norden Kameruns abgebaut wird und auf jedem Marktplatz billig erhältlich ist (Abbildung 1). Je nach Region wird der Stein in der Küche für unterschiedliche Speisen verwendet. Eine gelbe Sauce wird in Westkamerun zu zerkleinerten Taro-Wurzeln genossen, deren braune, stärkehaltig-fleischige Knollen an Kartoffeln erinnern.

Vor dem Kochen wird der Kanwan-Stein in Wasser gelöst und aufbewahrt. Palmöl wird erwärmt, portionsweise Wasser zugesetzt und mit einem Kochlöffel umgerührt.

Ohne weiteres Erhitzen wird nach und nach das Kanwan-Wasser-Gemisch dazugegeben, bis auf der gelblichen Flüssigkeit schließlich kein Öl mehr schwimmt. Chemisch findet eine Verseifung des Öls mit Alkalicarbonat statt. Das homogene Reaktionsprodukt bildet tatsächlich seifenähnliche Schaumblasen am Rand des Topfes. Abschließend kommen Gewürze, Fleisch oder Fisch hinzu. Die Sauce ist nun fertig zum Verzehr.



Abbildung 1: Kanwan, ein basisches Mineral aus Kamerun.

Kanwan wird auch als Weichmacher für Ndolé-Blätter (Bitterspinat) und Bohnen verwendet, um den Kochprozess zu beschleunigen. Der basisch-seifige Geschmack macht sich im Essen bemerkbar.

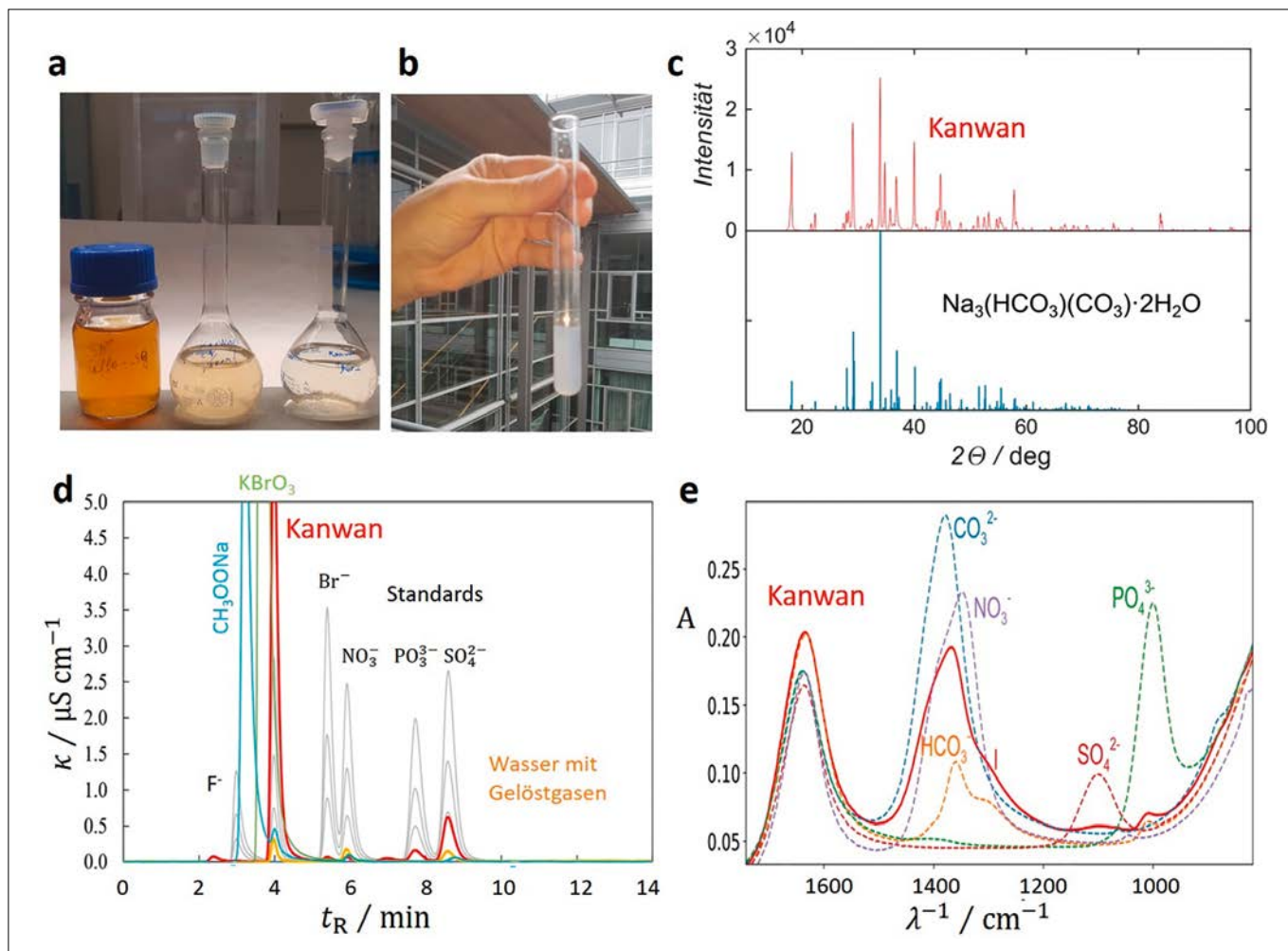


Abbildung 2: (a) Kanwan-Lösung, (b) nasschemischer Chlorid-Nachweis, (c) Röntgendiffraktogramm, (d) Ionenchromatogramm, (e) Infrarotspektrum.

Nach längerer Beobachtung hat C. H. Pevoubou-Kaffo festgestellt, dass die meisten Bewohner in Westkamerun, die Kanwan verzehren, an einer regional typischen Krankheit leiden: Auf der Hautoberfläche an bestimmten Körperstellen wachsen kugelartige, kleine Erhebungen, die üblicherweise nicht ärztlich behandelt werden. Wir haben den Verdacht, dass Bromid eine Rolle spielen könnte.

Kanwan chemisch betrachtet

Das gelblich-braune Mineral riecht markant stechend und reagiert alkalisch in wässriger Lösung. In einem Liter Wasser lösen sich bis zu 194 g pulverisiertes Kanwan als orange-braune Suspension (Dichte 1,13 kg/L). Verdünnte Lösungen erscheinen klar und oberhalb 36 g/L gelblich-trüb (Abbildung 2).

Die Phasenanalyse einer pulverisierten Kanwan-Probe mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) beweist ein Alkali-carbonat als Hauptbestandteil. Kanwan ist demnach ein Soda-Natron-Mineral, in Reinform „Trona“ genannt, mit der molaren Masse 229 g/mol. Das Infrarotspektrum bestätigt ein nahezu reines, wasserhaltiges Carbonat.

Die thermogravimetrische Analyse (TGA) belegt einen Schwund von 28 % flüchtigen Stoffen beim Erwärmen von Kanwan auf 100 °C. Dies ist etwas mehr als der Kristallwassergehalt von Trona, denn neben Wasserdampf gast auch CO_2 aus. Die reizende Geruchskomponente ließ sich thermoanalytisch nicht sicher bestimmen. Oberhalb 650 °C zersetzt sich Kanwan unter Abspaltung von Kohlendioxid.

Die quantitative Elementaranalyse einer wässrigen Kanwan-Lösung mit Emissionsspektroskopie (ICP-OES) erkennt die Hauptbestandteile Natrium und Kalium, gefolgt von Schwefel (als Sulfat) und Calcium als Nebenbestandteile (Tabelle 1). In Spuren sind Bor, Magnesium, Aluminium, Bismut und Eisen enthalten. Spuren von Gallium, Beryllium, Selen und Mangan liegen knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze (1 $\mu\text{g}/\text{kg}$). Die vollständig in Wasser lösliche Probe (10 g/L) wurde für die ICP-Messung 1 : 10 verdünnt. Ein Aufschluss unlöslicher Anteile entfällt.

Bereits im Infrarotspektrum der mit Kanwan gesättigten wässrigen Lösung erscheinen Banden für Carbonat, Hydrogencarbonat, Sulfat, Phosphat und Nitrat. Chlorid zeigt sich bei der nasschemischen Fällung mit Silbernitratlö-

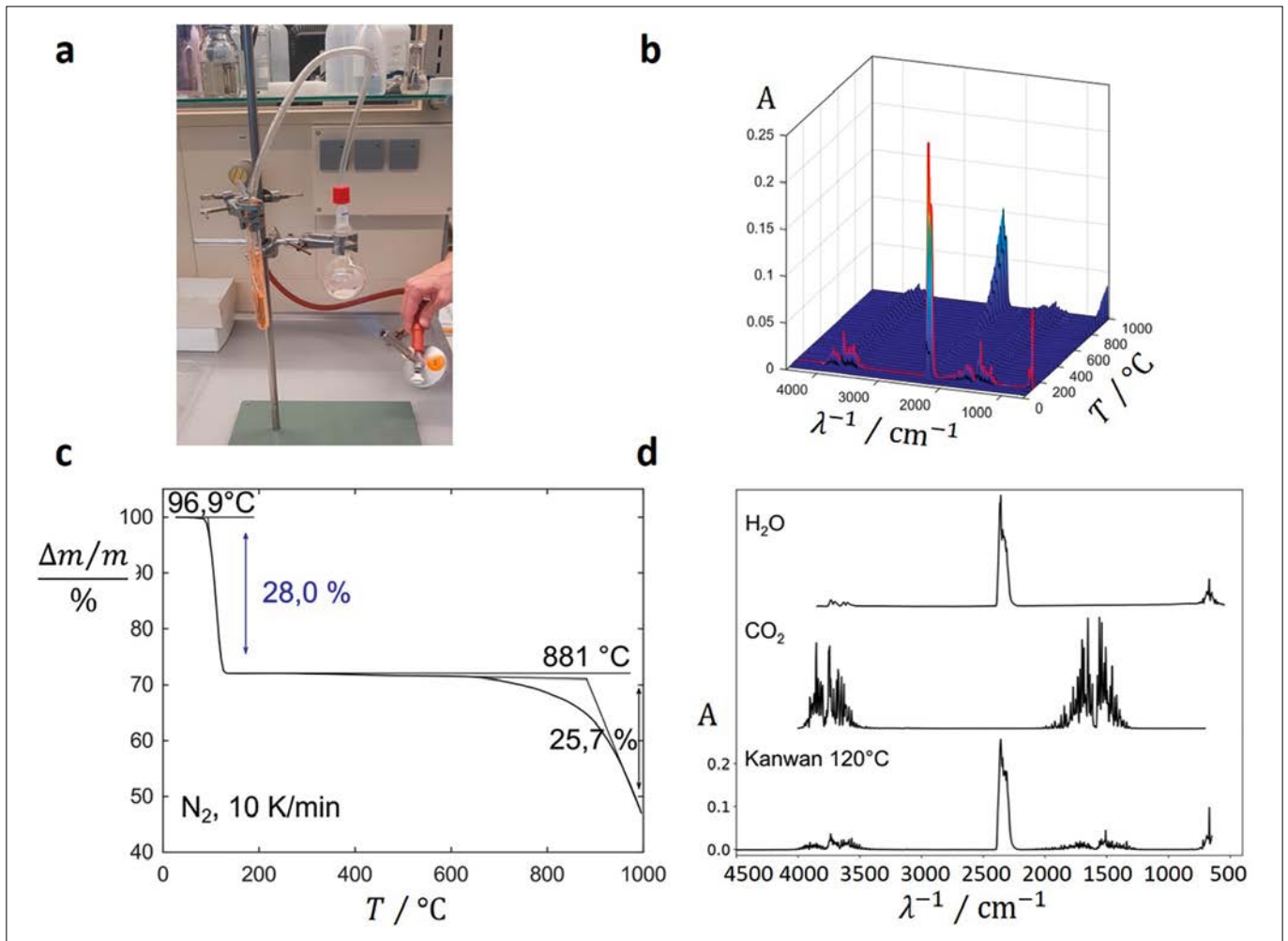


Abbildung 3: (a) Thermolyse von Kanwan, (b und d) TGA-IR-Befund der ausgasenden Stoffe: Wasserdampf und Kohlendioxid, (c) Thermogravimetrische Analyse.

Tabelle 1: Analysenergebnisse zu Kanwan: 1 mg/g = 1 μ/kg = 0,1 %

Messmethode	Ergebnis
pH	9,9 (Lösung: 10 bis 60 g/L)
Leitfähigkeit	0,010 bis 0,045 S/cm (Lösung: 10 bis 60 g/L, 22°C)
XRD	Na ₃ (HCO ₃)(CO ₃)·2H ₂ O
ICP-OES	Gehalt im Feststoff mg/kg (Lösung 10 g/L): Na (285 000 = 28,5 %), K (18 480 = 1,85 %), S (2944 = 0,24 %), Ca (105 = 0,011 %), B (48), Mg (25), Al (16), Bi (14), Fe (11), Ga (5), Be (3), Mn (2), Se (1). Spuren bis 0,001 mg/L: Sr, Ni, Cd, Ba. Unterhalb der Bestimmungsgrenze: Cr, Cu, Co, Li, Pb, Te, Tl, Zn
Ionenchromatografie	Gehalt im Gestein (mg/g): Cl- 28, [SO ₄] ²⁻ 5,7 %, [PO ₄] ³⁻ 4,3, Br- 0,79 %, [NO ₃]- 0,64

sung. Ammonium, Sulfit und Sulfid spielen keine Rolle. Die Ionenchromatografie bestätigt Chlorid als wichtigstes Anion neben Carbonat. Carbonat erscheint nicht im Chromatogramm, weil ein Carbonat/Hydrogencarbonat-Puffer als Laufmittel verwendet wurde. Im Promillebereich kommen Bromid, Nitrat, Phosphat und Sulfat im Mineral vor. Acetat und Bromat wurden durch Vergleichsproben

ausgeschlossen. Fluorid liegt unterhalb der Bestimmungsgrenze (0,1 mg/L).

Der charakteristische Geruch von Kanwan erinnert an Chlorwasserstoff. Bei der massenspektrometrischen Analyse im Dampfraum über dem Feststoff ist HCl nachweisbar (*m/z* 36 und 38; Cl 35 und 37). Spuren anderer

flüchtiger Komponenten verbergen sich unter den Signalen der Luftbestandteile.

Ein größeres Gasvolumen wurde daher durch Erhitzen der Probe in ein Reagenzglas mit Wasser ausgetrieben. Einige Tropfen Indikatorlösung zeigen eine pH-Änderung von Neutral (grün) ins schwach Saure (orange) an (Abbildung 3). Kanwan selbst reagiert basisch. Die ionenchromatografische Untersuchung des Wasserreservoirs mit den gelösten Gasen belegt erneut Chlorid und Bromid. Auch das Oxidationsprodukt Bromat [BrO₃]- wurde anhand einer Vergleichslösung verifiziert.

Kochen mit Brom

Die basischen Inhaltsstoffe von Kanwan spalten beim Kochen Fette in Fettsäuresalze auf. Natriumcarbonat und Hydrogencarbonat werden hierzulande als ungefährliche

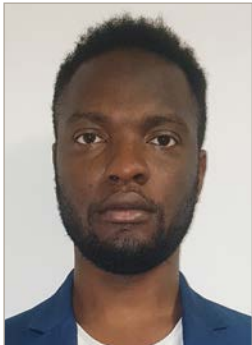
Backtriebmittel und Lebensmittelzusatzstoffe (E 500) eingesetzt, dürfen aber nicht von Köchen ins Essen gemischt werden. Allein die Volksmedizin wählt Natron gegen Sodbrennen und als Zusatz in Kohlgerichten gegen Blähungen.

Ausgasende Halogenwasserstoffe verleihen Kanwan den leicht stechenden Geruch. Die in Kamerun beobachteten Hautausschläge passen zur „Brom-Akne“ [2], die bei Bromidvergiftungen durch Medikamente bekannt ist. Bromid, wenngleich in geringer Konzentration vorhanden, bildet im alkalischen Medium krebserzeugendes Bromat. Die deutsche Trinkwasserverordnung sieht dafür einen Grenzwert von 0,01 mg/L vor, der in Kamerun keine gesetzliche Grundlage hat. Gleiches gilt für Bor (1 mg/L), das in Form von Boraten im Grundwasser natürlich vorkommt [3].

Referenzen:

- [1] Geographica, Weltatlas mit Länderlexikon, Tandem Verlag, Potsdam 2009.
- [2] P. Altmeyer, M. Bacharach-Buhles, Brom-Akne, in: Die Online-Enzyklopädie der Dermatologie, Venerologie, Allergologie und Umweltmedizin. <https://www.altmeyers.org/de/dermatologie/brom-akne-297>.
- [3] WHO: Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, CH-Genf, 2011, S. 323-324. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf

Kontakt:



Christian Hermann Pevoubou Kaffo

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



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Susanne Bradfish, CTA

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

s.bradfish@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

Unternehmensführung in Zeiten der Corona Pandemie und die Suche nach dem “New Normal” in der Arbeitsorganisation

Zusammenfassung

Diese Untersuchung ist Teil der Erkenntnisse, die vom Verfasser während eines Praxissemesterprojektes bei der VALEO IT Personalservice Gruppe, einem international tätigen IT-Dienstleistungsunternehmen mit Hauptsitz in der nördlichen Oberpfalz, erarbeitet wurden.

Aus Datenschutzgründen werden die Ergebnisse in zusammenfassender Form präsentiert.

Die Unternehmensgruppe ist als mittelständisches IT-Dienstleistungsunternehmen im B2B-Sektor mit aktuell ca. 225 Mitarbeitern positioniert. Es verfügt neben dem Headquarter in Bayern über weitere Standorte bzw. Tochterunternehmen in Deutschland, Rumänien, auf den Philippinen und in Mexiko. Die Mehrzahl der Mitarbeiter arbeitet außerhalb Deutschlands. Die Unternehmensgruppe ist stark wachsend, auch in der Pandemiezeit. Das nachhaltige Wachstum des Unternehmens auch während der Pandemie führt im Jahr 2021 zur Prämierung durch das Bayerische Wirtschaftsministerium unter den „Bayerns Best 50“.

Abstract

This study is part of the findings developed by the author during a practical semester project at the VALEO IT Personalservice Group, an internationally active IT services company headquartered in the northern Upper Palatinate.

For data protection reasons, the results are presented in summary form.

The group is positioned as a medium-sized IT service company in the B2B sector with currently approx. 225 employees. In addition to its headquarters in Bavaria, it has further locations and subsidiaries in Germany, Romania, the Philippines and Mexico. The majority of employees work outside Germany. The group of companies is growing strongly, even during the pandemic period. The company's sustained growth, even during the pandemic, leads to its being named one of "Bavaria's Best 50" by the Bavarian Ministry of Economic Affairs in 2021.

Organisatorisch befinden sich das Upper-Management bzw. die Konzernführung sowie einige Zentralfunktionen an der Firmenzentrale in Luhe-Wildenau; die wertschöpfungsorientiert aufgestellten Standorte bzw. Tochterunternehmen verfügen jeweils über eine lokale operative Führungsstruktur. Ein lebendiges Zusammenspiel zwischen Konzernführung und lokalem Management mit vielen persönlichen Treffen war historisch die Regel. Häufiger persönlicher Austausch auf allen Ebenen, Job-Rotation zwischen den Standorten und vielfältige internationale Interaktion und entsprechende organisierte Arbeitsteams sind die Regel. Die Unternehmenskultur

wurde über die Jahre stark ausdifferenziert und betont Mitarbeiterentwicklung, -zufriedenheit und regelmäßige persönliche Kommunikation stark. Dies drückt sich in der Praxis in vielfältigen Formaten z. B. in der Führungskommunikation oder bei Teambuilding-Programmen auf allen Ebenen des Unternehmens aus.

Mit der ersten Pandemiewelle ab März 2020 entstand annähernd gleichzeitig in allen Standorten und Ländern eine jeweils individuelle Lockdown-Situation, welcher das Unternehmen mit einer kurzfristigen Umstellung auf Homeoffice-Strukturen begegnete. Dies war bei der

großen Mehrzahl der Arbeitsplätze möglich. In einigen Ländern bestehen auch heute noch Lockdown-Regeln mit einem letztlich „erzwungenen“ Homeoffice-System.

Die beschriebene Führungs- und Unternehmenskultur musste seit diesem Zeitpunkt ebenfalls auf ein „remote“ bzw. weitgehend „virtuelles“ Programm umgestellt werden. Es gibt Standorte, welche von der Konzernleitung seit März 2020 nicht mehr persönlich besucht werden konnten. Ebenso mussten Recruiting-, Onboarding- und Trainingsprozesse seit dieser Zeit ebenfalls in einem „remote“-Modus durchgeführt werden.

Mittlerweile hat sich die Pandemie-Lage an der Mehrzahl der Standorte zumindest etwas entspannt. So können zumindest eingeschränkt wieder persönliche Treffen organisiert werden. An einzelnen Standorten bestehen dennoch immer noch harte Lockdown-Regeln und Reise-restriktionen, besonders im asiatischen Raum.



Abbildung 1: Beispiel Leistungszentrum der VALEO-IT-Personalservice in Sibiu (Hermannstadt), Rumänien. Der Standort wurde während der Pandemie im Jahr 2020 bezogen.

Nach nunmehr 1,5 Jahren in dieser „neuen“, durch die Rahmenbedingen der Pandemie bestimmten Arbeitsorganisation interessiert sich die Unternehmensführung für das Erleben der Mitarbeiter in dieser Situation. Um eine sachlich fundierte Ausgangslage in den verschiedenen Standorten und Arbeitsgruppen zu erheben, wurde durch den Verfasser eine strukturierte Mitarbeiterbefragung durchgeführt. Aufgrund der Internationalität der Mitarbeiter wurde dies als Online-basierte Befragung über das Befragungstool Lamapoll organisiert. (Vgl. www.lamapoll.de)

Die Befragung sollte zu folgenden Forschungsfragen Input bzw. Antworten liefern, welche in Workshops zusammen mit der Geschäftsleitung erarbeitet wurden:

1. Haben Führung, Mitarbeiterentwicklung und Informationstransport unter der Corona-Pandemie und den damit verbundenen Maßnahmen, wie z. B. Homeoffice-Strukturen, gelitten?
2. Haben sich Betriebsklima und Kollegenbeziehungen durch die Lockdown-Situation und die Homeoffice-Situation verschlechtert?
3. Die bisherige Unternehmenskultur setzt stark auf menschliche Nähe und persönliche Interaktion. Homeoffice-Strukturen sind insofern für den Betrieb eine neue Entwicklung. Wie denken Mitarbeiter über Homeoffice versus Präsenzoffice nach der gemachten Erfahrung in der Pandemiezeit?
4. Welche Ängste bestimmen die Mitarbeiter in der Corona-Krise? Was gilt es nun zu „überwinden“?
5. Durch das starke Wachstum des Unternehmens wurden zahlreiche Mitarbeiter auch während der Corona-Zeit eingestellt. Ist der Onboarding Prozess im „remote“-Modus gelungen und fühlen sich die „jungen“ Mitarbeiter gut integriert?
6. Welche Unterschiede bestehen im Erleben der Pandemie-Zeit in den verschiedenen internationalen Standorten. Führt die größere räumliche Distanz ohne persönliche Top-Management-Interaktion vor Ort zu einem negativeren Erleben im Vergleich zu den deutschen Standorten?
7. Sind Homeoffice-Strukturen auf internationalen Standorten für die betroffenen Mitarbeiter räumlich und technisch schwieriger umzusetzen als im Inland?
8. Führen interkulturelle Unterschiede zu einem unterschiedlichen Erleben in den internationalen Standorten? Leiden „emotionaler“ geprägte Kulturen stärker unter Homeoffice?
9. Führen unterschiedliche Arbeitsgebiete der Mitarbeiter zu einem unterschiedlichen Erleben bei Führung und Zusammenarbeit in der Pandemiezeit?
10. Welche Ansatzpunkte ergeben sich für das „New normal“ einer zukünftigen Arbeitsorganisation im Gestaltungsfeld zwischen (Büro-)präsenz und Homeoffice?
11. Wie haben die Mitarbeiter individuell die Managemententscheidungen in der Pandemie erlebt? Hätte man im Management etwas besser machen können?



Abbildung 2: Beispiel Leistungszentrum der VALEO-IT-Personalservice in Zaponan (Guadalajara), Mexiko

Um diese Forschungsfragen zu hinterfragen, wurde ein Fragebogen mit 48 Fragen entwickelt. Die Fragen gliedern sich in die drei Komplexe:

- Führung, Information und Mitarbeiterentwicklung
- Erfahrungen in der Pandemiezeit
- Betriebsklima und Kollegen

Die Fragen waren teils mit ordinal-skalierten Antwortmöglichkeiten, teils mit offenen Fragen, operationalisiert. Der Fragebogen wurde zweisprachig angeboten. Es wurde ein Pretest durchgeführt, um die allgemeine Verständlichkeit der Fragen zu überprüfen. Die online-Veröffentlichung des Fragebogens wurde durch eine Video-Botschaft und einen Recall des geschäftsführenden Gesellschafters begleitet, um die Wichtigkeit der Bearbeitung zu betonen. Der Fragebogen wurde allen 225 Mitarbeitern zur Verfügung gestellt. Der Bearbeitungszeitraum betrug eine Woche. Es haben 162 Mitarbeiter an der Befragung teilgenommen und die Fragen beantwortet. Dies entspricht einer Rücklaufquote von ca. 72 %, also ein sehr guter Wert für eine schriftliche Befragung. Die hohe Rücklaufquote spricht auch für das hohe Involvement der Mitarbeiter gegenüber dem Befragungsgegenstand.

Die Auswertung wurde als univariate Analyse über die Standardauswertungstools der Software erstellt. Es wurden ferner Split-Auswertungen nach den Ländern, den Arbeitsgebieten der Mitarbeiter und der Betriebszugehörigkeit durchgeführt, um Unterschiede im Antwortverhalten von Teilgruppen zu erkennen.

Welches sind die wesentlichen Erkenntnisse?

Zu Forschungsfrage 1 und 2 zeigen sich im Antwortverhalten positive Einschätzungen zu Führung und Zusammenarbeit. Die entwickelten virtuellen Formate im Führungsbereich, in Verbindung mit persönlichen Kontakten soweit möglich, funktionieren offenbar auch über 1,5 Jahre Pandemiezeit erfreulich gut.

Forschungsfrage 3 bezieht sich auf die Erfahrungen mit Homeoffice aus Mitarbeitersicht. Die Erfahrungen mit Homeoffice werden überwiegend positiv bewertet.

Forschungsfrage 4 bezieht sich auf die Ängste der Mitarbeiter während der Pandemie. Diese Frage war im Fragebogen als offene Frage gestellt, um die Befragten möglichst wenig zu beeinflussen. Die Antworten dazu wurden qualitativ geclustert und auf 4 zentrale Cluster aggregiert. Mit großem Abstand die meisten Nennungen erhält der Bereich Angst vor Ansteckung mit dem Virus persönlich oder in der Familie. Danach rangieren Ängste des persönlichen Job-Verlustes oder Sorgen bezüglich der Stabilität des Arbeitgebers bzw. Standortes. Wiederum danach folgen Ängste aus dem Bereich der Auswirkungen des Lockdowns wie z. B. Kontaktbeschränkungen, weniger soziale Kontakte, Vereinsamung etc. Folgende Abbildung zeigt dies im Überblick.

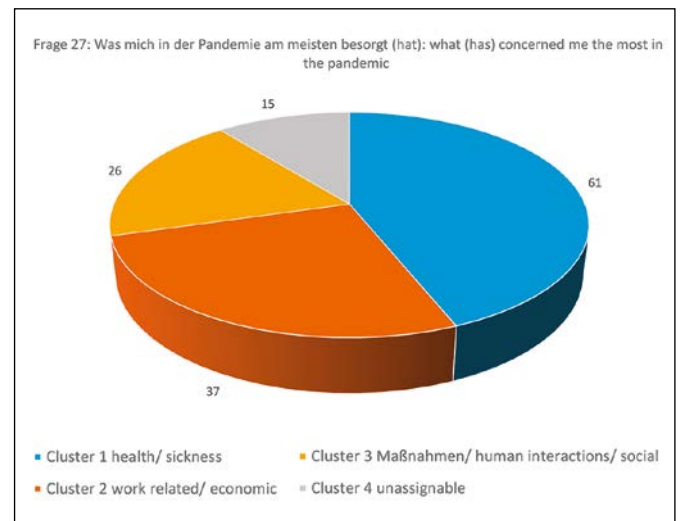


Abbildung 3: Clusterauswertung zum Thema "Sorgen in der Pandemiezeit"

Die Struktur der Ängste ist international in den verschiedenen Standorten ähnlich ausgeprägt. Die hohe Angst vor Ansteckung steht offenbar auch in einem Zusammenhang mit der hohen Akzeptanz der Home-Office-Struktur.

Forschungsfrage 5 bezieht sich auf die Integration und das Onboarding neuer Mitarbeiter während der Coronazeit und fokussiert Mitarbeiter, die erst nach dem 1.1.2020 ins Unternehmen gekommen sind. Die tatsächliche Zufriedenheit dieser Gruppe liegt tendenziell sogar über der Einschätzung der langjährigen Mitarbeiter. Dies spricht für einen erfolgreich durchgeführten Integrationsprozess im Rahmen der "remote"-Programme.

In Forschungsfrage 6 geht es um eine differenzierte Betrachtung der internationalen Standorte mit Blick auf das Erleben der Führung während der Pandemiezeit. Die Führung wird in allen Standorten ähnlich positiv erlebt. Die Kombination aus wirkungsvoller lokaler operativer Führung und ergänzenden überwiegend virtuellen Formaten zur Einbindung des Upper-Managements aus der Konzernzentrale bewährt sich also.

Forschungsfrage 7 betrifft die Erfahrungen der Mitarbeiter in den Ländern mit der technischen und räumlichen Umsetzung der Homeoffice-Strukturen. Interessanterweise gelingt dies in allen Ländern weitgehend reibungslos, auch in den vermeintlich schwächer entwickelten. Dies gilt speziell auch für eine stabile und „schnelle“ Internetversorgung in den Wohnorten der Mitarbeiter. Diese wird speziell in Rumänien und Mexiko sogar deutlich besser eingeschätzt als bei den Mitarbeitern in Deutschland. Dies zeigt einmal mehr, dass Deutschland generell im Bereich der digitalen Infrastruktur im internationalen Standortvergleich in der subjektiven Wahrnehmung der betroffenen Menschen offenbar keine Vorteile ausspielen kann.

Frage 8 sucht nach kulturell bedingten Unterschieden im Gesamterleben der Pandemiesituation im Zusammenhang mit der Arbeitssituation. Tatsächlich sind hier keine auffälligen Unterschiede feststellbar. Das Erleben im Ländervergleich weitgehend homogen.

In Forschungsfrage 9 geht es um erlebte Unterschiede je nach Arbeitsgebiet der Mitarbeiter. Hier gibt es teilweise Unterschiede. Möglicherweise sind nicht alle Arbeitsgebiete in gleichem Ausmaß „Homeoffice-geeignet“.

Forschungsfrage 10 thematisiert die wichtige Frage des „new Normal“ in der Arbeitsorganisation speziell hinsichtlich Homeoffice versus Präsenzoffice. Übergreifend über alle Länder wünschen sich viele Mitarbeiter das Beibehalten von Homeoffice-Angeboten, zumindest als Hybrid-Modell. Das hohe Ausmaß der Hinstimmung zu Homeoffice ist insbesondere mit Blick auf die gegebene Unternehmenskultur etwas überraschend. Gleichzeitig wünschen sich viele Mitarbeiter gezielte soziale Interaktion mit Kollegen und Führung in geeigneten persönlichen Formaten, z. B. in Teambuilding-Programmen oder persönlichen One-to-One Führungsgesprächen.

Die Forschungsfrage 11 beschäftigt sich mit einer Rückmeldung an die Konzernführung im Sinne von Verbesserungsvorschlägen zum Umgang mit der Pandemiekrise. Auch diese Frage wurde als offene Frage gestellt. Die Antworten wurden qualitativ geclustert. Die größte Clustergruppe antwortete mit „alles gut gemacht“ bzw. „keine Verbesserungsvorschläge“. Eine geringere Anzahl Ideen thematisierten praktische Unterstützung bei der Errichtung des privaten Homeoffice.

Aus den vorangegangenen Ausführungen lassen sich folgende *zusammenfassende Punkte* von besonderer Bedeutung ableiten:

Die Wahrnehmung der Pandemiekrise, das Erleben der veränderten Arbeitsorganisation und die mit der Krise verbundenen Ängste sind international und interkulturell erstaunlich homogen.

Für das „new Normal“ einer zukünftigen Arbeitsorganisation spielt die große und ebenfalls international stabile Hinstimmung zu Homeoffice zumindest als Hybridlösung eine große Rolle. Da gleichzeitig aber auch Bedürfnisse nach wieder intensiverer sozialer Interaktion formuliert werden, erscheinen hier auch flexible Lösungen prüfenswert.

In diesem Zusammenhang könnte auch eine weitergehende statistische Analyse der Datenbasis überlegt werden, um zu erkennen, ob die hinsichtlich einer möglichen Ansteckung mit Covid besonders ängstlichen Mitarbeiter besonders stark auf Homeoffice-Lösungen orientiert sind.

Projektpartner:

VALEO IT Servicii Personal SRL, 300001 Timisoara, Rumänien
VALEO IT SERVICIOS S DE RL DE CV, 45050 Zapopan Jalisco, Mexiko

Kontakt:



Prof. Dr. Frank Schäfer

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

f.schaefer@oth-aw.de

Skalierbare Simulationsansätze für die numerische Schweißsimulation

Prof. Dr. Franz Magerl

Zusammenfassung

Insbesondere beim Fügen komplexer Baugruppen kann die Schweißstruktursimulation zum Erkenntnisgewinn über erwartete Verzüge und Eigenspannungen und somit zu Prozessverständnis und Prozessoptimierung beitragen. Allerdings steigen mit der Komplexität der Baugruppe auch die Modellgröße und somit auch die Rechenzeit stark an, so dass im praktischen Einsatz die Simulation oftmals aufgrund der benötigten Zeit für die Modellierung und Berechnung nicht in Betracht gezogen wird. Neben den üblichen, volltransienten Ansätzen existiert eine Anzahl von Vereinfachungen, die im Rahmen der Studie bewertet wurden. In den letzten Jahren sind hierbei große Fortschritte zur Reduzierung der Simulationszeitdauer mit vereinfachten Modellen zur Schweißverzugs- und Eigenspannungsberechnung erzielt worden. Jedoch muss hierbei immer beachtet werden, dass sich quantitative und insbesondere auch die qualitativen Ergebnisse verschlechtern. Der Simulationsansatz "Thermal Cycle" ist sehr gut für eine große Anzahl von Schweißnähten mit einer großen Flexibilität der zeitlichen Steuerung des Schweißprozesses geeignet. Die Schweißspannung und die Schweißstromstärke sind für diese Simulation nicht notwendig, da sich die maximale Temperatur am Schmelzpunkt des ausgewählten Schweißzusatzwerkstoffes orientiert. Mit den Simulationsansätzen "Single Shot" und insbesondere "Shrinkage" kann die Simulationsdauer deutlich reduziert werden, wobei sich die qualitativen Ergebnisse dementsprechend verschlechtern. Leider gibt es aktuell noch keine fundierten Aussagen und Empfehlungen, bei welchen Schweißbaugruppen der entsprechende Simulationsansatz verwendet werden kann und soll, um einen qualitativen Trend bezüglich des Schweißverzuges darzustellen.

Abstract

The distortions and residual stresses can be predicted by computer simulation to determine appropriate welding strategies to minimise them. A fully coupled transient thermo-mechanical simulation works in the way that in each time increment a temperature field is calculated. After each thermal step follows the mechanical one, where thermal strains are calculated out of the already given temperature field and acting as mechanical loads for distortion and stress calculation. Further possibility to significantly reduce the needed calculation time is the usage of so called thermal cycle instead of a transient heat source. It is possible to replace the heat flux by a prescribed time-temperature-curve acting on the complete weld line at once. This approach shows good distortion results for problems where distortions are caused by shrinkage with reducing the calculation time significantly. Single-shot solution automatically replaces all heat sources in the model with thermal cycle and also recalculates welding duration of each weld line as well as deactivation times of fixtures, applying all heat sources at once. Depending on the particular model the result quality can be sufficiently high, or rather low. A further step is the Shrinkage approach, only usable for processes, where all weld lines are also having filler material. In this approach the non-linear material behaviour and heat transfer between filler elements and base material is neglected. The result quality is highly dependent on the particular model.

1 Einleitung

Die numerische Schweißsimulation ermöglicht skalierbare Simulationsansätze, bei denen je nach gewünschter Ergebnisqualität die Komplexität des Modells so flexibel einstellbar ist, dass dadurch die Rechenzeit zwischen mehreren Wochen und wenigen Stunden skaliert werden kann. Er werden mehrere Optionen angeboten, das Modell zu vereinfachen und – als Ergebnis – die benötigte Rechenzeit zu reduzieren. Besonders wertvoll ist diese Funktionalität

- für große Schweißmodelle mit zahlreichen Komponenten und manchmal hunderten Schweißnähten, die mit dem gewöhnlichen transienten Ansatz lange Rechenzeiten haben;
- in Situationen, wo mehrere Varianten von Schweißbaugruppen berechnet werden sollen und es dabei um den Vergleich verschiedener Baugruppen geht (zum Beispiel Positionen von Spannwerkzeugen oder Versteifern). [1]

Vereinfachungsansätze reduzieren stets die Qualität und die Menge der Ergebnisse, doch für bestimmte Untersuchungen reichen sie häufig aus. Für Vereinfachungen eines Schweißmodells kommen verschiedene Ansätze oder Kombinationen davon in Betracht [2]:

- Vernachlässigung von Kopplungseffekten oder Reduzierung des Levels der Kopplung.
- Vernachlässigung des Einflusses bewegter Wärmequellen; dadurch wird das plastische Aufstauchen vereinfacht abgebildet.
- Vernachlässigung des Einflusses der Schweißfolge; alle Lasten werden auf einmal aufgebracht.

Methode	Rechenzeit	Ergebnisqualität	Ergebnisse	Beschreibung
Transient	Sehr hoch	Sehr hoch	Eigenstressungen, Dehnungen, Verzug, Werkstoffzustand	Lichtbogen/Strahl bewegt sich schrittweise entlang der Schweißlinie. Jeder Schritt wird thermisch und mechanisch berechnet. Der Wärmefluss der Ersatzwärmequelle bestimmt die Geometrie des Schmelzbades und der Wärmeeinflusszone.
Transient (entkoppelt)	Hoch	Hoch	Eigenstressungen, Dehnungen, Verzug, Werkstoffzustand	Lichtbogen/Strahl bewegt sich schrittweise entlang der Schweißlinie. Jeder Schritt wird thermisch, jeder n-te mechanisch berechnet. Der Wärmefluss der Ersatzwärmequelle bestimmt die Geometrie des Schmelzbades und der Wärmeeinflusszone.
Temperaturzyklus	Mittel	Mittel bis hoch	Eigenstressungen, Dehnungen, Verzug	Schweißgut wird komplett (wahlweise schrittweise) aufheizt. Die Temperatur ist vordefiniert.
Einschuss-Lösung	Schnell	Gering mit mittel	Eigenstressungen, Verzug	Alle Schweißpfade werden gleichzeitig aufheizt. Die Temperatur ist vordefiniert.
Schrumpfung	Sehr schnell	Gering bis sehr gering	Verzugsrichtung und Tendenz	Schweißgut wird ab der Schmelztemperatur heruntergekühlt. Der Verzug wird durch Schrumpfen es Schweißgutes bestimmt.
Thermisch	Schnell	Sehr hoch	Temperaturfeld	Eine rein thermische Lösung zur Kalibrierung des Modells.

Abbildung 1: Übersicht der skalierbaren Simulationsansätze [3]

2 Modellvereinfachungen beim Schmelzschweißen

Für das thermische Fügen sind fünf Modellierungsansätze nutzbar: Von genauer, aber langsamer transienter thermomechanischer, voll gekoppelter Rechnung bis hinunter zum schnellen einfachen Schrumpfen. Damit besteht die Flexibilität, den passenden Ansatz für das jeweilige Berechnungsziel zu wählen.

Bei einer voll gekoppelten transienten thermomechanischen Simulation wird in jedem Zeitinkrement ein Temperaturfeld berechnet. Diese thermische Berechnung braucht – verglichen mit der mechanischen – noch relativ wenig Rechenzeit, und diese sinkt auch in gutem Verhältnis zur Anzahl der verwendeten Prozessorkerne. Wenn es sich um ein Material mit Gefügeumwandlung handelt, werden auch die Gefügeanteile während des thermischen Schrittes berechnet; dann ist es praktisch ein thermo-metallurgischer Schritt. Nach jedem thermischen Schritt folgt ein mechanischer, wo aus dem gerade ermittelten Temperaturfeld thermische Dehnungen berechnet werden. Diese fungieren als mechanische Lasten, aus denen Verzüge und Spannungen resultieren. In Bezug auf die Rechenzeit ist dieser mechanische Schritt recht aufwändig.

Wenn das Modell gut konvergiert und die thermische Berechnung gute realistische Ergebnisse liefert, kann normalerweise die oben beschriebene volle Kopplung durch eine schwache Kopplung ersetzt werden. Das heißt, dass nicht auf jedes thermische Inkrement ein mechanisches folgt, sondern nur auf jedes n-te-Inkrement, wobei n eine Zahl größer 1 ist. Bei konvergierenden Modellen mit ausreichend kleinen Zeitinkrementen geht dabei gewöhnlich nicht viel Genauigkeit verloren, aber die Rechenzeit sinkt rapide. Der Level der Entkopplung kann in Simufact Welding für jeden Lastfalltyp (Schweißen, Abkühlen, Erwärmen usw.) einzeln für jeden Prozess definiert werden. Zusätzlich zur Entkopplung kann man auch die Menge der Ausgabedaten reduzieren und Plattenspeicherplatz sparen, indem man Ergebnisse nur für gekoppelte Inkremente anfordert. Die Entkopplung ändert nichts am Modell, es ändert sich nur der Level der Kopplung.

Eine weitere Möglichkeit, die Rechenzeit deutlich zu reduzieren, ist die Verwendung eines sogenannten Temperaturzyklus statt der transienten Wärmequelle. Denn eine transiente Berechnung, bei der die Wärmequelle als bewegter Wärmestrom modelliert wird, benötigt viele Rechenschritte, um diese Bewegung abzubilden. Die Alternative ist, den Wärmestrom durch eine vorgegebene Temperatur-Zeit-Kurve zu ersetzen, die auf die gesamte Schweißnaht auf einmal wirkt. Dieser Ansatz liefert gute Ergebnisse für den Verzug bei Problemstellungen, wo der Verzug durch das Schrumpfen entsteht, vernachlässigt aber die meisten Stauchungseffekte. Die Rechenzeit wird dabei erheblich reduziert.

Außerdem gibt es noch Vereinfachungsansätze, die auch die Schweißfolge vernachlässigen. Die Einschuss-Lösung ersetzt automatisch alle Wärmequellen im Modell durch Temperatur-Zeit-Kurven und berechnet auch die Schweißdauer jeder Schweißnaht sowie die Deaktivierungszeit von Spannwerkzeugen neu, wobei alle Wärmequellen auf einmal aufgebracht werden. Je nach Modell kann die Ergebnisqualität ausreichend hoch oder eher niedrig sein. Für ein bereits erzeugtes Modell ist es wenig Aufwand,

auf diesen Vereinfachungsansatz zu wechseln. Der Anwender muss nur die Einschuss-Lösung in den Prozesseinstellungen aktivieren und eine Temperaturzyklus-Tabelle zum Aufbringen der Wärme wählen.

Eine weitere Vereinfachung bietet der Ansatz des Schrumpfens. Er ist nur anwendbar für Prozesse, bei denen alle Schweißnähte ein Schweißzusatzmaterial haben. Hier werden das nichtlineare Materialverhalten und der Wärmeübergang zwischen Nahtelementen und Grundmaterial vernachlässigt. Die Nahtelemente erfahren eine thermische Belastung, die zu einem Schrumpfen führt; durch die Schrumpfung verformt sich auch der Rest der Baugruppe. Die Ergebnisqualität ist stark modellabhängig – manche Modelle eignen sich sehr gut für solche Ansätze, andere produzieren etwas ungenaue Ergebnisse. Um den Schrumpfungs-Ansatz zu aktivieren, muss der Anwender ihn nur in den Prozesseinstellungen anklicken. Alles Weitere berechnet die Simufact Welding Benutzeroberfläche automatisch.

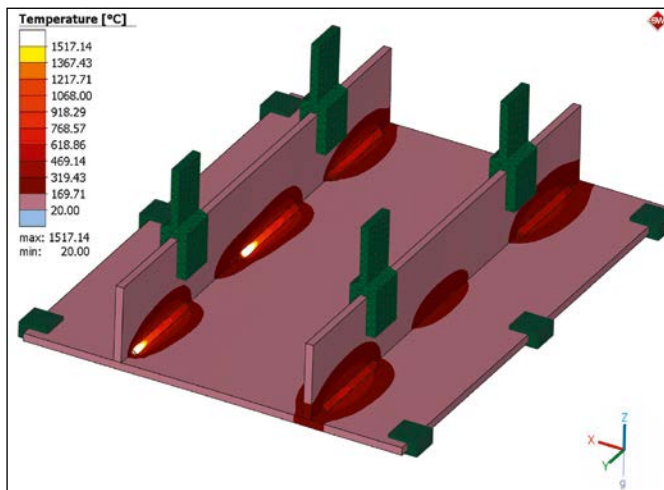


Abbildung 2: Temperaturfeld für das Referenzbeispiel

3 Referenzbeispiel zur Bewertung der unterschiedlichen Simulationsansätze

Die nachfolgenden Schweißsimulationen wurden mit den unterschiedlichen skalierbaren Ansätzen durchgeführt. Neben der Darstellung der jeweiligen Rechenzeiten und dem Gesamtverzug wird auf spezifische Modellierungsanforderungen hingewiesen. Grundsätzlich kann – basierend auf der umfangreichen transienten Schweißsimulation mit und ohne Phasenumwandlung – durch geringfügige Modifizierungen ein gewünschter skalierbarer Simulationsansatz mit reduzierter Rechenzeit ausgeführt werden. Für die Grundsatzuntersuchungen wurde die Vernetzung mit 65000 Hexaeder-Elementen mit 67000 Knoten und einem linearen Verschiebungsansatz (ohne Zwischenknoten) durchgeführt. Die Kontaktberechnung wurde hierbei mit dem Ansatz "Nodes to Segment", die Coulombsche Reibung mit einem Reibungskoeffizient 0,3 und Simulation wurde mit 4 Domänen und 2 Kernen durchgeführt.

4 Ergebnisse

Transiente Simulation ohne Phasenumwandlung: Für die transiente Analyse mit und ohne Phasenumwandlung muss die grundlegende Schweißsimulation aufgebaut werden. Bei der Materialwahl für die Bauteile und dem Schweißnahtwerkstoff muss aufgepasst werden, dass ein umwandlungsfähiger Werkstoff aus der Datenbank ausgewählt wird. Wichtig zur Bewertung des Schweißverzuges ist eine „freie“ Lagerung des gesamten Bauteiles. Dies kann durch die punktuelle Fixierung an Knotenpunkten nach dem Schweißprozess und während der Abkühlphase erfolgen. Durch die Aktivierung des erweiterten Materialmodells wird eine Simulation mit Phasenumwandlung durchgeführt. Bei den Schweißtrajektorien muss der „transiente direkte (Leistung, Energie pro Länge, Wirkungsgrad) oder indirekte Modus (Spannung, Strom, Wirkungsgrad)“ ausgewählt werden.

Thermal Cycle (Thermischer Zyklus): Bei den Schweißtrajektorien müssen der Modus „Thermischer Zyklus“ ausgewählt und eine Zeit-Temperatur-Tabelle geladen werden; sonst bleiben alle Einstellungen gleich. Das Prozessdiagramm wird automatisch für den Thermischen Zyklus angepasst und muss jedoch überprüft werden, ob alle Lagerungsbedingungen nach dem Schweißprozess und während der Abkühlphase eingehalten werden.

Single Shot (Einschuss-Lösung): Hierbei muss nur bei den Prozessparametern der „Schnelle Zyklus“ ausgewählt und eine Zeit-Temperatur-Tabelle geladen werden. Das Prozessdiagramm wird automatisch für die Einschuss-Lösung angepasst und muss jedoch überprüft werden, ob alle Lagerungsbedingungen nach dem Schweißprozess und während der Abkühlphase eingehalten werden.

Shrinkage (Schrumpfung): Hierbei muss nur bei den Prozessparametern der „Schnelle Zyklus“ ausgewählt und die Schrumpfungsmethode aktiviert werden.

Das Prozessdiagramm wird automatisch für die Schrumpfungsmethode mit einer sehr langen und automatisch aktivierten Abkühlzeit angepasst. Es muss wiederum überprüft werden, ob alle Lagerungsbedingungen nach dem Schweißprozess und während der Abkühlphase eingehalten werden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse (Gesamtverformung, 1. Hauptspannung (maximale Zugspannung), 3. Hauptspannung (maximale Druckspannung und Rechenzeit) für die unterschiedlichen Simulationsverfahren dargestellt. Zusätzlich wurden der Einfluss der Reibung und die Erhöhung der Anzahl der Kerne von 2 auf 4 auf die Rechenzeit untersucht und dargestellt. Die Referenzberechnung erfolgte mit 38000 Hexaederelementen (dreilagiger Aufbau) und exemplarisch mit dem Elementtyp

Thick Shell (einlagiger Aufbau) mit 12800 Elementen und jeweils einer gleichen Oberflächennetztopologie.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse – Referenz mit Volumennetz

	Varianten	Max. Verformung [mm]	1. HS [MPa]	3. HS [MPa]	Rechenzeit [s]
1	Transiente Analyse ohne Phasenumwandlung	0,65	649	-489	9388
2	Thermal Cycle (Thermischer Zyklus)	0,73	559	-366	3860
3	Single Shot (Einschuss-Lösung)	0,27	644	-640	1829
4	Shrinkage (Schrumpfung)	0,35	601	-242	164

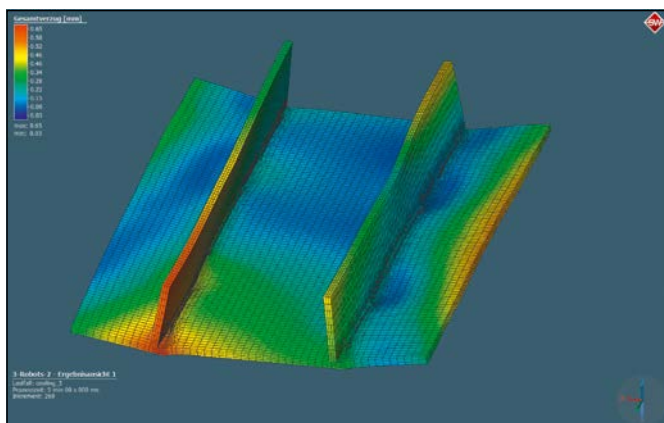


Abbildung 3: Transiente Analyse – Hexaederelemente

5 Zusammenfassung

- Die Methode “Thermal Cycle” weist sehr gute Ergebnisse bezüglich des Schweißverzuges mit einer akzeptablen Rechenzeit auf.
- Bezüglich der Rechenzeit ist die Methode “Shrinkage” unschlagbar – mit den Randbedingungen einer deutlich geringeren Genauigkeit und Aussagekraft bezüglich des Schweißverzuges.
- Eine Erhöhung der Anzahl der Rechenkerne und der Anzahl der Domänen muss sich nicht in einer kürzeren Rechenzeit infolge des aufwändigeren Datentransfers widerspiegeln. Als Faustformel gilt, dass für ca. 10000 Elemente ein Kern und eine Domäne ausreichend sind. Das Produkt aus Anzahl der Kerne und der Domänen wird hierzu zur Auswahl der Einstellungen herangezogen.
- Für die Berechnungsmethode Thermal Cycle erhöhte sich bei 2 Domänen und 8 Kernen die Rechenzeit auf 4125 s im Vergleich zur Referenz mit 4 Domänen und 2 Kernen mit einer Rechenzeit von 3860 s.
- Bei einer reibungsfreien Simulation konnte die Rechenzeit um ca. 10 % reduziert werden bei gleichbleibenden Verformungsergebnissen
- Bei einer Anzahl von 4 Domänen und 4 Kernen mit Berücksichtigung des Reibungseinflusses konnte die Rechenzeit um ca. 10 % reduziert werden bei gleichbleibenden Verformungsergebnissen.
- Bei Erhöhung der Elementanzahl durch Netzunterteilung von 65000 auf 146000 Volumenelementen und der Knotenzahl von 67000 auf 163000 erhöhte sich die Rechenzeit von 9388 s auf 41000 s bei einer transienten Analyse mit 4 Domänen und 2 Kernen. Hierbei wurde die Vernetzung der beiden senkrechten Platten mit dem Faktor 2 in die drei Koordinatenrichtungen feiner vernetzt. Eine Verdreifachung der Elementanzahl führte zu einer Vervierfachung der Rechenzeit. Vor Start der Simulation besteht leider keine Möglichkeit, die Simulationsdauer vorherzusagen. Zur Bewertung der Rechenzeit sollten deshalb weitere Untersuchungen mit Praxisbeispielen durchgeführt werden.

Referenzen:

- [1] Radaj, D., (2002), Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen – Rechen- und Messverfahren Fachbuchreihe Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS
- [2] Goldak, J. und Akhlaghi, M., (2005) Computational Welding Mechanics, Springer Science+Business Media
- [3] Simufact Welding V2021

Kontakt:

Prof. Dr. Franz Magerl

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

f.magerl@oth-aw.de

Zusammenfassung

Seit 2004 verfügt die OTH Amberg-Weiden über einen Windkanal am Standort Amberg und betreibt dort Lehre, angewandte Forschung und Technologietransfer im Arbeitsgebiet der Aerodynamik. Im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten wurden unterschiedlichste Geometrien untersucht und optimiert – oft in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Die Messstrecke im Windkanal verfügt über einen Durchmesser von 1 m und einer Länge von 1,5 m. Es können Strömungsgeschwindigkeiten bis 60 m/s (ca. 216 km/h) erreicht werden. Um den Einfluss verschiedener Fahrzeuggeometrien auf den Luftwiderstand, das Fahrverhalten und den Energieverbrauch darzustellen, ist es notwendig, möglichst viele Geometrien unabhängig voneinander untersuchen und vergleichen zu können. Um dies zu erreichen, wurde ein 1:8-Modell aufgebaut. Die dazu erstellte Konstruktion besteht im Wesentlichen aus einem Grundkörper und verschiedenen Bausteinen, die daran montiert und gegeneinander ausgetauscht werden können. Alle Bauteile wurden im 3D-Druck aus Kunststoff hergestellt. Mithilfe der verschiedenen Modelle kann eindrucksvoll der Einfluss verschiedener Maßnahmen in der Praxis gezeigt werden. Der Bericht wird zusätzlich durch kurze Filmbeiträge (QR-Code) ergänzt.

Abstract

Since 2004, the OTH Amberg-Weiden has owned a wind tunnel at its Amberg location, where it conducts teaching, applied research and the transfer of technological knowledge in the field of aerodynamics. Within the scope of various project and degree theses, a wide variety of geometries have been investigated and optimized – often in cooperation with industrial partners. The measuring section in the wind tunnel has a diameter of 1m and a length of 1.5m. Flow speeds of up to 60 m/s (approx. 216 km/h) can be achieved. In order to demonstrate the influence of different vehicle geometries on drag, driving behavior and energy consumption, it is necessary to be able to investigate and compare as many geometries as possible independently of one another. To achieve this, a 1:8 model was built. The construction created for this purpose essentially consists of a base body and various building blocks that can be mounted on it and exchanged for one another. All components were produced from plastic using 3D printing. With the help of the various models, the influence of different measures can be impressively demonstrated in practice. The report is supplemented by short film clips (QR code).

1 Der Windkanal der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH AW)

Ein Windkanal ist eine technische Vorrichtung, dessen Aufgabe es ist, eine Modell- oder Großausführung eines Objektes mit einem konstanten, gleichförmigen und turbulenzarmen Luftstrom zu umströmen. Dadurch werden dessen aerodynamische Eigenschaften untersucht, um mögliche Optimierungen an der Geometrie vorzuneh-

men. Ein Windkanal bietet damit die Möglichkeit, sowohl Grundlagen der Strömungsmechanik und der Aerodynamik anschaulich zu vermitteln als auch konkrete Aufgaben, z. B. aus der Industrie, durchzuführen.

Mit einer Antriebsleistung von 110 kW verfügt die OTH AW über einen Windkanal, wie ihn nur sehr wenige der bayerischen HAWs (Hochschule für angewandte Wissenschaften) und THs (Technische Hochschulen) bieten können.

Im Jahr 1996 wurde der Windkanal vom Strömungsmechanischen Institut der Universität Erlangen-Nürnberg durch die FH (jetzt OTH) Amberg-Weiden und das Applikations- und Technikzentrum (ATZ) in Sulzbach-Rosenberg (jetzt Fraunhofer Institut) übernommen und im ATZ aufgebaut. 2004 wurde er dann nach Amberg auf das Gelände der Fachhochschule verlegt. Dazu wurden sowohl ein neues Gebäude errichtet (siehe Abbildung 1) als auch der Antrieb und die Messtechnik komplett erneuert. Alle Stahlbauteile wurden sandgestrahlt und pulverbeschichtet. Damit entstand ein Windkanal, der hinsichtlich der Antriebs- und Messtechnik dem Stand der Technik entspricht und dessen Einsatzmöglichkeiten kontinuierlich erweitert werden. Die offene Messstrecke (Göttinger-Bauart [1]) verfügt über einen Durchmesser von 1 m und einer Länge von 1,5 m. Es können Strömungsgeschwindigkeiten bis 60 m/s (ca. 216 km/h) stufenlos erzeugt werden. Widerstands- und Auftriebskräfte werden durch Wägezellen bestimmt und automatisch mit einem PC erfasst und einer eigens erstellten Software ausgewertet.

Im Laufe der Jahre wurden viele Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten – meist in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie – in den Bereichen strömungstechnischer Optimierung von Windkraftanlagen, Vermessung von Motorradhelmen, Simulation der Ausbreitungen von Emissionen in Fabrikanlagen (in Form von Modellanlagen) etc. durchgeführt. Auch *Running Snail*, das Formula-Student Team der OTH AW, optimierte das Aerodynamik-Paket ihrer Rennwagen z. T. im OTH AW-Windkanal. Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der Strömung in der Messebene ist es auch möglich, Strömungsmessgeräte zu kalibrieren. Auch in der Lehre wird der Windkanal für Praktika oder zur Verdeutlichung der Vorlesungsinhalte mittels z. B. der Strömungssichtbarmachung mit der Rauchlanze regelmäßig eingesetzt.

Die Darstellung der durch den Luftwiderstand auf ein generisches Fahrzeug wirkenden Kräfte und deren Abhängigkeit von der Fahrzeuggeometrie wurde nun im Rahmen der diesem Bericht zugrundeliegenden Bachelorarbeit von Ioan Dinica B. Eng. untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden exemplarisch präsentiert und diskutiert.

2 Aerodynamische Untersuchungen an einem 3D-gedruckten KFZ-Modell-Baukasten

Die Aerodynamik spielt eine wichtige Rolle im Entwicklungsprozess moderner Fahrzeuge [1]. Sie beeinflusst wesentliche Eigenschaften. Zum einen stehen im Vordergrund die Fahrleistungen, die im Laufe der Jahre stetig zugenommen haben. Zum anderen hat die Aerodynamik auch einen wesentlichen Einfluss auf den Verbrauch und die damit einhergehenden Emissionen. Unter anderem können auch weitere, für den Endverbraucher wichtige Aspekte, wie die Kühlung, die Sicht oder der Komfort

durch die geschickte Wahl aerodynamischer Optimierungen beeinflusst werden. Der Luftwiderstand ist direkt proportional zur zweiten Potenz der Fahrzeuggeschwindigkeit. Deshalb wird dessen Einfluss vor allem hinsichtlich höher werdender Reisegeschwindigkeiten immer wichtiger. Vergleicht man den Luftwiderstand des gleichen Fahrzeuges bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h mit dem bei 170 km/h (also der Vergleich von Stadtfahrt zur sportlichen Autobahnfahrt), so ist der Luftwiderstand bei 170 km/h 10-mal so groß als der bei 50 km/h.

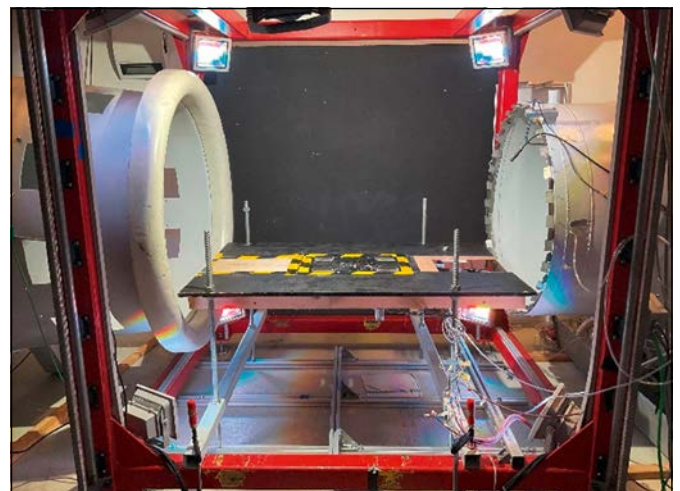


Abbildung 1: Windkanal der OTH-AW; oben Außenansicht, unten die Messstrecke mit Düse (rechts), 4 Wägezellen (Mitte) und Kollektor (links)

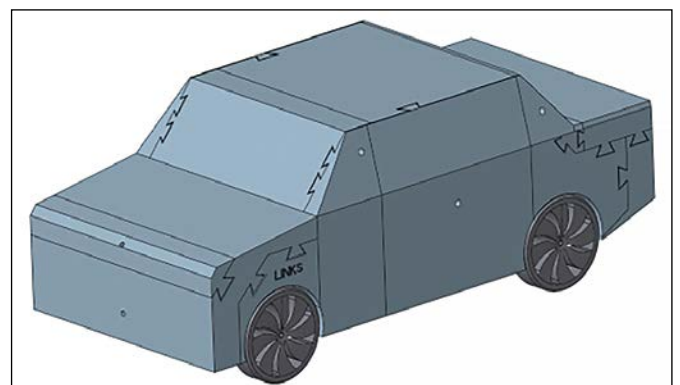


Abbildung 2: Fahrzeugmodell der Stufenheck-Variante

Um aerodynamische Untersuchungen und Optimierungen vornehmen zu können, musste zunächst eine vollständig parametrisierte Konstruktion angefertigt werden.

Sinn des Ansatzes war es, möglichst viele Geometrien unabhängig voneinander zu untersuchen und vergleichen zu können. Um dies zu erreichen, wurde ein 1:8-Modell mit den Proportionen eines heutigen Fahrzeuges der Mittelklasse (Audi A4, BMW 3er, Mercedes C-Klasse...) nach [1] aufgebaut. Die durch den Bearbeiter der Bachelorarbeit – Ioan Dinica, B. Eng. – erstellte Konstruktion besteht im Wesentlichen aus einem Grundkörper und verschiedenen Bausteinen, die daran montiert werden können. Die einzelnen Bausteine wurden aus Kunststoff (PLA – Polyactide) mit einem 3D-Drucker (Ender 3 PRO) gefertigt. Die Aerodynamik eines Fahrzeuges wird durch dessen Hauptgeometrien im Wesentlichen definiert. Diese sind z. B. die Motorhaube, der Windschutzscheibenwinkel, der Winkel der Heckscheibe oder auch der Unterboden-Diffusor. All diese Hauptgeometrien werden jeweils durch eigene, repräsentative Bausteine in verschiedenen Iterationsstufen realisiert. Durch die „LEGO-Bauweise“ ist es zudem möglich, verschiedene Fahrzeuggrundformen wie ein Stufenheck (Limousine) oder ein Vollheck (Kombi) durch den Wechsel einzelner Bausteine direkt (nacheinander) miteinander zu vergleichen. Dieses modulare, generische Fahrzeugmodell soll zukünftig zur Unterstützung des Moduls „Fahrzeugaerodynamik“ in der Lehre eingesetzt werden.

Abbildung 2 zeigt, wie alle Bauteile an den Grundkörper angebunden sind. Hierbei wurde eine im konventionellen Maschinenbau eher ungewöhnliche Verbindungstechnik gewählt. Es wurden Schwalbenschwanzführungen ausgewählt, die im Holzbau sehr häufig Verwendung finden. Dadurch wurde ein schnelles und einfaches Wechseln aller Bauteile ohne Werkzeuge gewährleistet. Auch hinsichtlich des verwendeten Fertigungsverfahrens (3D-Druck) zeigte sich diese Verbindungstechnik von Vorteil, da damit einfach zu druckende Geometrien realisiert wurden. Dadurch war eine Nachbearbeitung wie das Schneiden eines Gewindes, das Einbetten von Muttern oder das Einbringen von Gewindeeinsätzen nicht notwendig.

3 Experimentelle Untersuchungen verschiedener Fahrzeuggeometrien

Als Ausgangsmodell wird die Stufenheck-Variante verwendet. Hier werden im ersten Schritt alle veränderbaren Geometrien wie die Neigung der Motorhaube, der Windschutzscheibe und der Heckscheibe oder die Größe der Fasse in der Nulllage verwendet. Aerodynamische Veränderungen werden hier durch den Luftwiderstandsbeiwert (c_w -Wert) beschrieben [1]. Der c_w -Wert ist eine dimensionslose Größe für den Strömungswiderstand eines umströmten Körpers. Die experimentell ermittelten Luftwiderstandsbeiwerte bieten in der Grundform die Grundlage und die Vergleichsbasis aller weiterführenden Messungen. An dieser Stelle werden exemplarisch nur zwei verschiedene Geometrien vorgestellt und diskutiert. Zunächst werden die Bilder der Strömungssicht-

barmachung miteinander verglichen und anschließend die c_w Werte in einem Diagramm dargestellt. Zusätzlich bieten die QR-Codes Zugriff auf die Videos der beiden Versuchsreihen.



Abbildung 3: Grundform des Stufenhecks

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der Strömung um das Fahrzeuggrundmodell. Die Sichtbarmachung erfolgt durch eine Rauchlanze. Gut zu erkennen sind Ablösegebiete (geschlossenes Gebiet mit Rückströmung, Strömung ist instationär und turbulent). Die Kante der Fasse an der Motorhaube (roter Pfeil) sorgt für ein großes Ablösegebiet stromab. Zudem ist die senkrechte Windschutzscheibe ein Staupunkt der Strömung (blauer Pfeil). Am Heck des Fahrzeuges ergibt sich ein Totwassergebiet (Ablösegebiete ohne Wiederanlegen der Strömung).

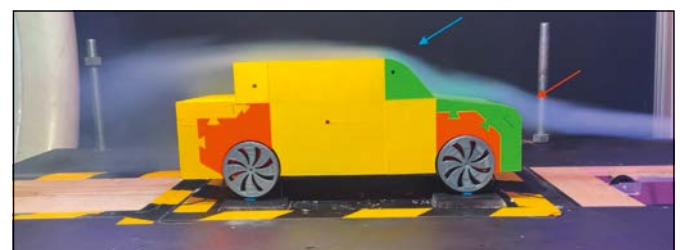
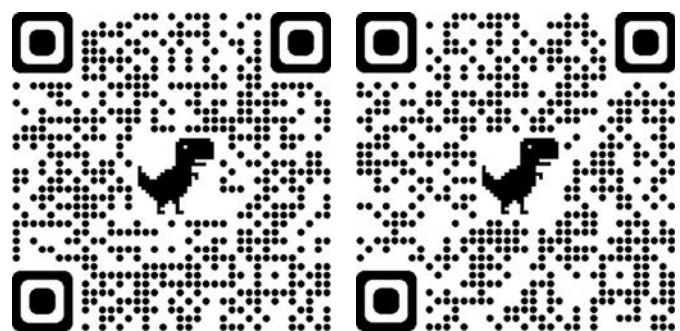


Abbildung 4: Stufenheck, optimierte Fahrzeugfront



Linker Code: Video zum Versuch der Abbildung 3.
Rechter Code: Video zum Versuch der Abbildung 4.

Abbildung 4 zeigt die Optimierung der Fahrzeugfront. Der Vergleich von Abbildung 3 und Abbildung 4 liefert eine sichtbare Verkleinerung der Ablösegebiete an der Fasse der Motorhaube und an der Kante zum Dach (weiße Pfeile). Erkennbar ist zudem, dass die Strömung dem Fahrzeugprofil besser folgen kann. Dies wurde durch die Neigung der Windschutzscheibe und der Motorhaube er-

reicht – vor allem jedoch durch die großzügigen Rundungen der zwei relevanten Kanten.

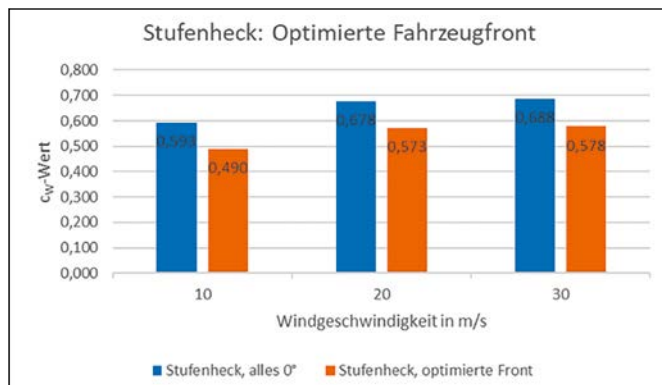


Abbildung 5: Optimierungen am Bug

In Abbildung 5 werden die c_w -Werte für das Stufenheck in seiner Grundform mit denen der optimierten Version verglichen. Die Ergebnisse bestätigen die durch die Strömungssichtbarmachung bereits erkannten, aerodynamischen Verbesserungen. Der c_w -Wert für das quaderförmige Modell betrug bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 20 m/s (72 km/h) 0,678 und bei 30 m/s (108 km/h) 0,688 – dieser scheint somit ab 20 m/s von der Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Reynoldszahl unabhängig. Durch die strömungsgünstigere Gestaltung am Bug ergab sich eine deutliche c_w -Verbesserung um ca. 100 c_w -

Punkte. Dabei entspricht ein c_w -Punkt einem Unterschied von 0,001 [1]. Die durch diese Optimierungen erreichten Verbesserungen sind signifikant und zeigen, dass die Strömung keinen scharfen Kanten folgen kann, sondern diese abgerundet werden müssen.

Vergleicht man die durch den Versuch ermittelten Werte mit denen aus der Literatur für ein Quaderförmiges Kraftfahrzeug (siehe Abbildung 2), so liegt dieser c_w -Wert in der Größenordnung eines Daimler Benz, Typ Stuttgart, aus dem Jahre 1928 ($c_w = 0,66$) [2].

4 Zusammenfassung und Ausblick

Aerodynamische Untersuchungen im Windkanal sind ein grundlegender Baustein im heutigen Entwicklungsprozess von Kraftfahrzeugen. Elektrisch betriebene Fahrzeuge erfordern, aufgrund ihrer derzeit noch vergleichsweise geringen Reichweite, umso größere Anstrengungen diesbezüglich. Das im Rahmen dieser Abschlussarbeit erstellte modulare Fahrzeugmodell bietet die Grundlage für weitere Untersuchungen verschiedenster Geometrien und Fahrzeuggrundformen. Dabei können weitere Optimierungen im laboreigenen 3D-Drucker gedruckt und dessen Einfluss auf den Luftwiderstand in der Praxis gezeigt und untersucht werden.

Referenzen:

- [1] H.-H. Braess und U. Seiffert, Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- [2] T. Schütz, W.-H. Hucho – Aerodynamik eines Automobils, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2013.

Kontakt:



Ioan-Bogdan Dinica, B.Eng.

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



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

Zusammenfassung

Im Rahmen eines von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe geförderten Forschungsprojekts entwickelt die OTH Amberg-Weiden in Kooperation mit der TU Berlin einen auf der Blaualge *A. platensis* basierenden Bioraffinerieprozess. Eines der Zielprodukte der angestrebten Wertschöpfungskette sind Exopolysaccharide (EPS), deren antivirale Wirkung bereits in einem vorhergehenden Forschungsprojekt am Beispiel des Koi-Herpes-Virus (KHV) gezeigt werden konnte. Weiterhin steht der blaue Farbstoff Phycocyanin im Fokus. Er soll durch eine neuartige Erntemethode gewonnen werden, bei der auf die Technologie der Pulsed Electric Fields gesetzt wird. Für die optimale Ausnutzung von Synergieeffekten wird zudem versucht, die erarbeitete Produktionskaskade schlussendlich an einen Biogasprozess zu koppeln. So soll die vor Ort anfallende Restwärme einerseits Verwendung im Algenkultivierungsprozess finden, andererseits kann die gebildete kohlenstoffreiche Algenbiomasse nach der Kultivierung als Gärsubstrat eingesetzt und zu Biogas umgesetzt werden, wodurch eine zusätzliche Wertschöpfung innerhalb der Kaskade erreicht werden soll. Damit bietet die aufgeführte Wertschöpfungskette das Potenzial, sowohl die Ökobilanz als auch die Wirtschaftlichkeit des Kultivierungsprozesses von *A. platensis* und der dezentralen Gewinnung von Biogas maßgeblich zu verbessern. Der folgende Artikel zeigt die Ergebnisse des ersten Projektdrittels auf, indem die Gewinnung von Biomasse und die nachgeschalteten Downstream-Prozesse eingehender untersucht wurden.

Abstract

Developing a value-added process based on the cyanobacterium *Arthrospira platensis* is the objective of a cooperation project between OTH Amberg-Weiden and TU Berlin, financed by the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. The primary products of the product cascade are exopolysaccharides (EPS) with antiviral activity, whose applicability against the highly infectious and lethal koi herpes virus (KHV) has been shown in preliminary research. The second high-value product, the protein-based pigment phycocyanin, shall be obtained as an aqueous extract by processing the algal biomass with a new technology based upon pulsed electric fields (PEF). Another unique feature of the project is the intended coupling of the value-added chain with biogas production, using waste heat and evaluating the possibility of converting the carbon-rich biomass residues to biogas. Therefore, this project improves both the overall economics by adding EPS as second high-value products to the downstream processing of *A. platensis* as well as the environmental performance by enhancing the utilization of residues and thermal energy of biogas plants. The following article presents the outcome of the first third of the project period, dealing with biomass growth and downstream processing aspects.

1 Introduction

Microalgae have captured the focus of process engineers as so-called third-generation biofuels. This attention is

not primarily based on their ability to fix CO₂ but rather on their advantages over terrestrial plants—for example, growth rate, lipid content, and reduced land-use conflicts because they are cultivated in photobioreactors. The last

benefit allows specific regulation of process parameters to achieve high, more or less environment-independent production rates. Despite those apparent advantages, economically viable production of algae as an energy source is only feasible at a few locations. More and more concepts of value-added chains have been proposed to increase the economic sustainability of alga-based processes. The focus lies on high-value products like pigments, proteins, lipids, carbohydrates, and biologically active substances used as cosmetics, therapeutics, or nutraceuticals. Sometimes, the product lining of microalgae is in itself interesting enough without the political buzzwords “energy” and “biofuel”.

The cyanobacterium *Arthrospira platensis* or Spirulina, rather known for its use as a dietary supplement, expresses sulfated polysaccharides, which show antiviral activity against a broad spectrum of animal and human viruses in cell culture experiments [1]. There has been a successful transfer of the antiviral effect of these compounds to *in vivo* systems: Exopolysaccharides (EPS) are used as feed for common carp, showing prophylactic and metaphylactic properties. Besides their therapeutic value, EPS are precious from a process engineering perspective: These sugar polymers are expressed extracellularly, enabling a decoupled downstream process without affecting the biomass and other products.

A. platensis also contains various pigments for the efficient use of photosynthetically active radiation (PAR). Besides the typical photosynthetic pigments, cyanobacteria express protein-based light-harvesting pigments, so-called phycobiliproteins. Due to the remarkable fluorescent properties and their hydrophilic character, phycobilins are valuable fluorescent dyes with many prospects in biotechnology and medical diagnostics [2]. The main phycobiliprotein in *A. platensis* is phycocyanin, a blue pigment with a Stokes shift of 21 nm. Because it was approved by the Food and Drug Administration (FDA) in 2013, opportunities for applications in food industries are enlarging the global market of phycocyanin, which is predicted to reach 1 billion USD by 2029.

Even though there are more possibilities of high-value products within the biomass of *A. platensis*, the decision of an additional downstream cascade is an economic trade-off. Nevertheless, one potential for the remaining exploited biomass should always be kept in the engineers’ minds: the transformation of biomass to energy carriers. The usage of algal biomass for anaerobic fermentation is hindered intrinsically by the unpropitious carbon-to-nitrogen ratio, mainly due to the high protein content of the biomass [3]. However, in the above-mentioned scenario, the phycobilin harvesting could counteract this unfavorable ratio by removing a substantial fraction of protein-nitrogen and therefore enable a direct usage of the biomass residues for biogas production.

Sounds feasible and straightforward, right? But only on paper! Differently from refinery processes based on crude oil, the fluctuations in the biomass composition drastically affect the economic viability. Those fluctuations bias several process parameters and characteristics, such as temperature, light supply, reactor geometry, biomass concentrations, nutrient supply, and mass-transport phenomena, among others. The parameters light and biomass concentration illustrate the complex—even divergent—interlinkage of the process parameters. The supplied light drives photosynthesis, which converts the radiation energy to chemical energy needed for the algae to divide and grow. However, growth, which translates to productivity, generates more biomass, which increases the so-called self-shading effect [4]. Countering the shading with strong light leads to photoinhibition and damages the pigments of the photosynthetic apparatus [5]. Admittedly, this is only half of the truth, as we have to consider day–night cycles, reactor geometry, harvesting schedules, etc.—and this is only for the issue of light supply.

All the mentioned parameters—and several unmentioned ones—are crucial in our approach to improve up- and downstream processing, with a focus beyond productivity and economics to achieve a closed-loop production. We present some of the outcomes of our research in the field of cultivation, filtration, and nutrient recycling, which may now still seem unconnected but will be merged as the project proceeds.

2 Upstream processing

One of the project’s objectives is to develop a pilot-scale photobioreactor for outdoor cultivations in a closed system. As the reactor geometry influences the light distribution and, due to the flow behavior, the residence time of cells in the radiation field, the chosen reactor concept and design determine the insurmountable limitations in terms of productivity. Thus, different reactor types, varying in light penetration depth, flow pattern, surface-volume ratios, materials, and sizes, were tested to determine their influences on growth performance (Figure 1A–D). The experimental data served as the basis for numerical culture growth models, which helped in understanding the different aspects in reactor design and scale-up, and finally led to the development of an airlift-pump-driven horizontal tubular reactor system (Figure 1E), combining a sufficient light supply in the horizontal tubings with a tolerable shear stress level in the airlift pump for flow generation.

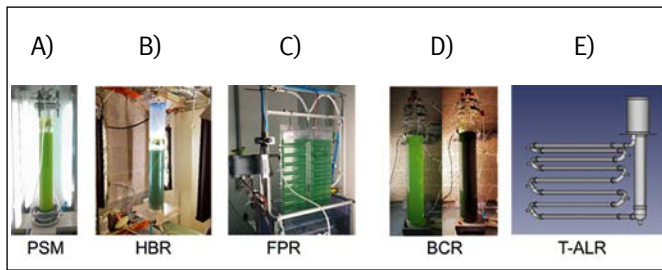


Figure 1: Different reactor systems characterized in the project: A) bubble column (glass), with a volume of 1 L and an average light path of 2.5 cm; B) bubble column (polyethylene PE), with a variable volume variable and an average light path of 2.5 cm; C) flat panel reactor (PE), with a volume of 6 L and an average light path of 2 cm; D) bubble column (glass), with a volume of 16 L and an average light path of 7.5 cm; E) airlift reactor (glass), with a volume of ~80 l and an average light path of 3 cm.

Besides the decision for the reactor systems, the developed numerical model shall aid in process development and even enable weather-forecast-based process control. Hence, this model has been fitted to experimental growth data obtained for different light intensities (Figure 2A and B) and temperatures, which are the most significant, non-constant parameters in outdoor cultivation.

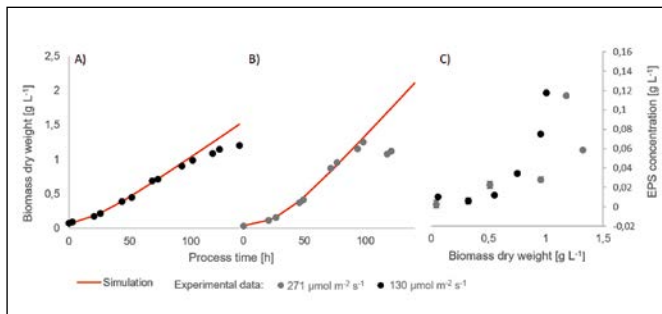


Figure 2: A) and B) Influence of different light intensities on the growth of *Arthrospira platensis* ($T = 30^{\circ}\text{C}$); C) influence of light on the exopolysaccharide (EPS)-biomass ratio. The symbols represent experimental data. The red lines represent the results of the fitted numerical simulation using a light limitation model based on the well-known Monod kinetics.

Predicting biomass growth is not the main challenge, as most high-value products do not simply correlate with the amount of biomass produced. Figure 2C displays the influence of light intensities on the EPS-biomass ratio. These data demonstrate that the excretion of EPS is enhanced by either higher biomass concentrations or a decline in growth and productivity (see Figure 2A and B where the experimental data start to deviate from the numerical model); the same results were also found for different temperatures and reactor types. Ergo, the process operation point with the highest amount of product does not simply lead to the highest productivity or space-time yield. Nevertheless, this issue of EPS concentration versus EPS productivity leads to the interplay of up- and downstream processing—in simple terms, twice the product concentration with half the downstream effort.

3 Downstream processing

A clever arrangement of unit operations in downstream processing is critical for establishing product cascades, reaching back to the choice of high-value products. In the basic idea of our concept, four separation steps should lead to four products, namely phycocyanin, EPS, biogas, and recycled nutrients (Figure 3).

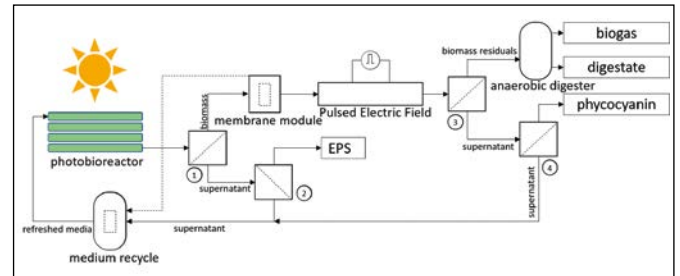


Figure 3: Basic process flowchart of the FNR-funded project (FNR = Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe).

The first separation step generates two fractions, the supernatant loaded with EPS and concentrated biomass; the latter of which is further processed by means of pulsed electric fields (PEF), separation step 3, and separation step 4 to phycocyanin and carbon-rich residual biomass. Different methods, ranging from simple dead-end filtration to different cross-flow filtrations and centrifugation, have been examined for separation 1, focusing on the integrity of the microalgal cells, the time requirement, and more technical concerns like integrability to different process modes.

The EPS, with a concentration of about $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, shall be concentrated using cross-flow filtration techniques. Our studies clearly show that cross-flow filtration systems with an independently regulated shear rate (dynamic cross-flow) allowed for higher flux rates (Figure 4) and thus an overall faster concentration process ($1050 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ vs. $700 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ for non-independent shear-rate).

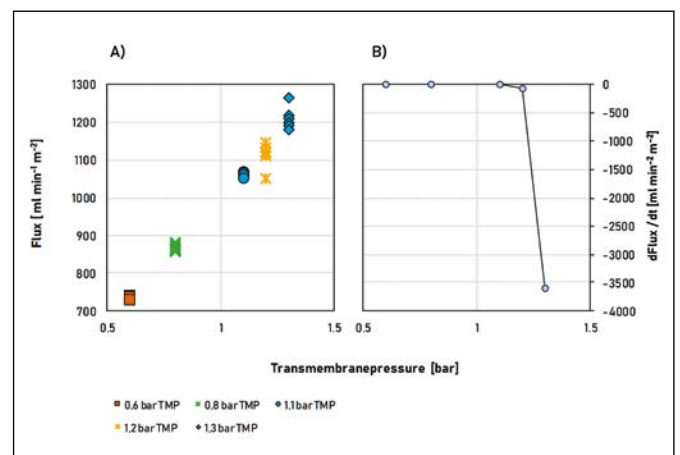


Figure 4: A) Relationship between Flux and Transmembrane pressure (TMP) for the EPS-concentration step. B) Fouling (as a decrease in flux over time) for the EPS-concentration step as a function of the TMP for a dynamic cross-flow filtration. Fouling occurs at a TMP of 1,1 bar as the EPS penetrate and block the porous filter discs used, resulting in a decreased permeate flux.

The maximum concentration factor reached until now is at 25. Due to the increasing concentration of EPS, the viscosity of the supernatant increases as well, leading to lower permeate fluxes and a higher probability of fouling. Further experiments with temperature variations shall help to further improve the concentration factor.

The permeate of separator 2 is mainly water with unutilised nutrients, which should be recycled for economic and ecologic reasons.

4 Recycling of the used cultivation medium

In the scope of this project, recycling of the used cultivation medium follows two aspects. First, raw materials, namely nutrient salts, shall be used economically, without altering growth behavior or biomass quality due to nutrient limitations. Second, the PEF Extraction requires media with low conductivities or ion concentrations ($1\text{--}5\text{ mS cm}^{-1}$ vs. $15\text{--}25\text{ mS cm}^{-1}$ in used media). The primary ion source of the medium is sodium bicarbonate ($\sim 17\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), coincidentally the sole inorganic carbon source of *A. platensis* (CO_2 in its ionic form). Despite being provided in excess, bicarbonate is the limiting nutrient during cultivation; it does not originate from microbial consumption but from a growth-related pH shift from around 9 to 12, which causes an equilibrium displacement from bicarbonate (HCO_3^-) to unmetabolizable carbonate (CO_3^{2-}). As a consequence, simply reducing the bicarbonate concentration in the medium to meet the requirements for the PEF extraction would have an adverse effect on cultivation because bicarbonate also acts as a buffer to prevent rapid changes in pH. All in all, PEF and cultivation are competitive objectives, and a fully economic solution has not been easy to find.

By the application of perm-cation-selective membranes, the cultivation could be decoupled from PEF, therefore enabling the use of optimized, highly nutritious media for cultivation. The principle (Figure 5A) is based on the exchange of monovalent H^+ ions from cheap technical acids and Na^+/K^+ ions from the medium, which in turn reduces the medium's pH. Such a shift leads to a complete regeneration of bicarbonate from carbonate if the pH is readjusted to 8. This approach allows for reusing the medium recycled in such a fashion because bicarbonate is the only limiting nutrient. When the medium is truly used up and no longer able to maintain high-quality biomass, the regeneration process can be exaggerated by lowering the pH to around 2. In these conditions, the bicarbonate ions are fully converted to carbonic acid, which quickly breaks down into water and CO_2 . As a weakly acidic gas, CO_2 exhibits only low conductivity compared with bicarbonate ions, making it a walk in the park to reach the optimum conductivity for PEF extraction.

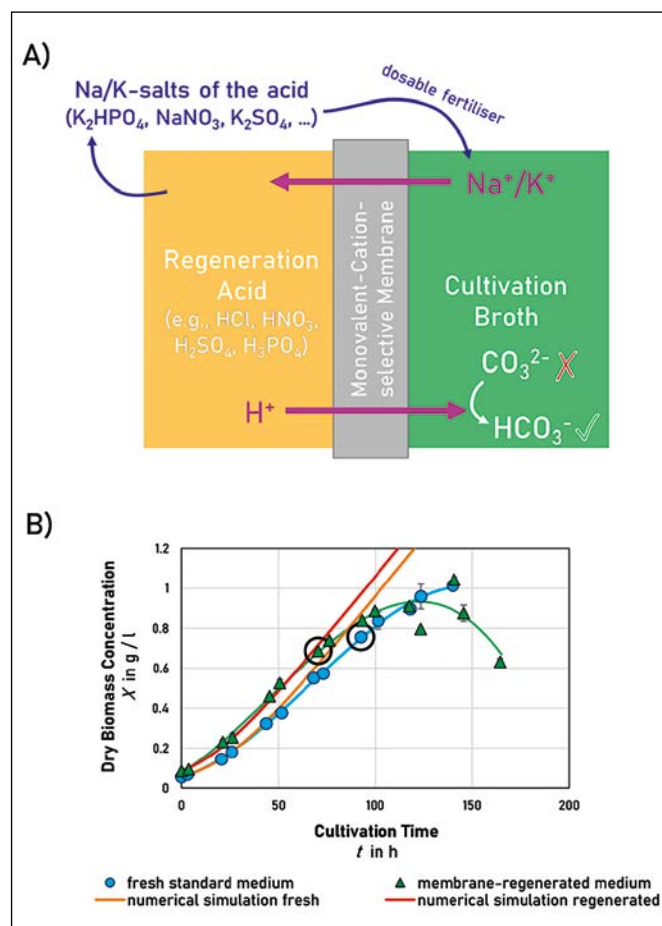


Figure 5 A) Schematic representation of the membrane-regeneration for medium recycling and pulsed electric field (PEF) conditioning with possible ways for further use of the regeneration acid as a fertilizer. B) Comparison of the growth curves of *Arthrospira platensis* in fresh standard and membrane-regenerated medium (30°C , $130\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, cultivated in the reactor shown in Figure 1B). The symbols represent experimental data with the error bars showing the 95% confidence interval from triplicate measurements; the lines represent the results of numerical simulations. The black circles indicate when the pH first exceeded 10.3, as this was found to be a critical point for *A. platensis*.

The growth behavior of *A. platensis* is not influenced by the regenerated medium (Figure 5B), and the recycling process can be repeated up to three times until nutrient limitations are perceptible, clearly indicating the efficacy and efficiency of the proposed solution to the multi-objective problem stated above. For appropriate insight, suitable analytics for the main medium components have been developed and serve as quality control of the recycling processes. The performed regenerations could be conducted prior to EPS harvesting, leading to higher concentrations of EPS after each cycle without influencing the EPS productivity. These findings might significantly impact the efficiency of the EPS-filtration process, which has to be investigated further.

References:

- [1] Reichert M, Bergmann S, Hwang JY, Buchholz R, Lindenberger C (2017). Antiviral activity of exopolysaccharides (EPS) from *Arthrospira platensis* against koi herpesvirus (KHV). *Journal of Fish Diseases*, vol. 40, pp. 1441–1450, doi:10.1111/jfd.12618
- [2] Fernández-Rojas B, Hernández-Juárez J, Pedraza-Chaverri J (2014). Nutraceutical properties of phycocyanin. *Journal of Functional Foods*, vol. 11, pp. 375–392, doi:10.1016/j.jff.2014.10.011
- [3] Ward AJ, Lewis DM, Green FB (2014). Anaerobic digestion of algae biomass: A review. *Algal Research*, vol. 5, no. 1, pp. 204–214, doi:10.1016/j.algal.2014.02.001
- [4] Jung SH, McHardy, C, Rauh C, Jahn A, Luzi G, Delgado A, Buchholz R, Lindenberger C (2021). A new approach for calculating microalgae culture growth based on an inhibitory effect of the surrounding biomass. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, vol. 44, no. 8, pp. 1671–1684, doi:10.1007/s00449-021-02550-6
- [5] Hahm J, Bauer A, Jung S, Zell N, Boßle F, Buchholz R, Lindenberger C (2021). Process parameter screening for the microalga *Chlamydomonas asymmetrica* in batch and turbidostat cultivations. *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 10, pp. 1–9, doi:10.1002/cite.20210004

Acknowledgement:

The authors thank Prof. Bischof and Prof. Kurzweil for their support and access to their laboratory infrastructure.

Funding agency:



Kontakt:



Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenbergler

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

c.lindenbergler@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



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



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

Im Labor Lasertechnik startete Anfang 2021 das Forschungsprojekt AKIRA. Hierfür wird, mit Unterstützung durch die Firmen Novanta und Gerresheimer, ein Ultrakurzpuls- (UKP) Lasersystem mit 2D- und 3D-Scanköpfen aufgebaut. Ziel der Kooperation ist es, das Potential des Lasersystems für den Einsatz in der Medizintechnik in ausgewählten Aspekten und seine Tauglichkeit im industriellen Umfeld zu untersuchen.

Individuelle Markierungen werden in der Medizintechnik immer wichtiger. Für den transparenten Kunststoff ZEONEX 690R werden unterschiedliche Laserparameter untersucht, die ein Markieren oder Abtragen mit hohem Kontrast ermöglichen. Die Untersuchungen zeigen, dass die Betrachtung der Gesamtenergie pro Linie (Linienenergie) F_{line} ein geeigneter Parameter für eine flächige Bearbeitung ist. Die Variation der Linienenergie zeigt einen deutlichen Trend; so können drei Bereiche unterschieden werden, Materialabtrag, Verfärbung mit Schädigung der Oberfläche und Verfärbung ohne Beschädigung. Bei Letzterem kann, mit niedriger Linienenergie, durch mehrfache Überfahrten die Intensität der Verfärbung (braun - schwarz) variiert werden.

Abstract

The AKIRA research project started in the Laser Technology Laboratory at the beginning of 2021. For this, with the support of the companies Novanta and Gerresheimer, an ultra-short pulse (USP) laser system with 2D and 3D scan heads is being set up. The aim of the cooperation is to investigate the potential of the laser system for use in medical technology in selected aspects and its suitability in an industrial environment.

Individual markings are becoming increasingly important in medical technology. Different laser parameters are being investigated for the transparent plastic ZEONEX 690R, which enable marking or ablation with high contrast. The investigations have shown that for two-dimensional processing, the consideration of the total energy per line (line energy) F_{line} is a suitable parameter. The variation of the line energy shows a clear trend. Here, 3 areas can be distinguished, material ablation, discolouration with damage to the surface and discolouration without damage. In the latter case, multiple passes at low line energy can vary the intensity of the discolouration (brown - black).

1 Einleitung

Die Medizintechnik steht vor neuen Herausforderungen. Individuelle Markierung von Medizinprodukten oder Primärpackmitteln – sei es zur Fälschungssicherung oder aber zur Rückverfolgbarkeit – wird in Zukunft eine zunehmende Rolle spielen. Dies ist vor allem dann schwer lösbar, wenn keine Farbstoffe als Additiv oder Aufdruck Verwendung finden sollen, wie bei dem ZEONEX 690R, der im vorliegenden Bericht vorrangig untersucht wurde.

Weiter können Produkte aus Glas oder Kunststoff hergestellt sein, was eine Anpassung der Beschriftungstechnologie an das Produkt erfordert.

UKP-Laser bieten eine interessante Alternative zu herkömmlichen Markierungsprozessen, da mit ihnen verschiedenste Materialien bearbeitet werden können. Der Wärmeeintrag kann klein und lokal gehalten werden. Dies ist insbesondere bei der Bearbeitung von Kunststoffen von Bedeutung, die ansonsten schnell zur Deformation

oder Bildung unerwünschter Nebenprodukte neigen. Auch ermöglicht das kontakt- bzw. kraftfreie Bearbeiten mit dem UKP-Laser feinste 3D-Strukturen mit extremen Aspektverhältnissen im Bauteil abzutragen, die konventionell nicht mehr darstellbar sind. Aber es lassen sich auch die Prozessgrenzen z. B. im Mikrospritzguss verschieben, wo üblicherweise Bauteile an kleinen Kaltverteiler angebonden werden, um sie noch fertigen zu können. Dies erleichtert das Handling an der Maschine, allerdings muss der Kaltverteiler wieder abgetrennt werden – ein heikler Prozessschritt, der durch UKP-Laser elegant gelöst werden kann. Bei ophthalmologischer Anwendung kann ein kleinster Grat zum Qualitätskriterium werden, da unmittelbar am Auge keinerlei Kanten bzw. unrunde Stellen zulässig sind. Oft sind aber Teile so klein, dass ein Grat weder vermieden noch sauber abgetrennt werden kann. Ein kaltes Abtrennen mittels Laser ist eine denkbare Option.

2 Werkstoff

Cycloolefin Polymere wie der ZEONEX 690R sind eine Klasse von Polymeren, die auf Cycloolefinmonomeren und Ethylen basieren. Verschiedene COP-Materialien sind unter verschiedenen Markennamen im Handel erhältlich: TOPAS von Topas Advanced Polymers GmbH [1], APEL von Mitsui Chemicals America Inc. [2], ARTON von Japan Synthetic Rubber Co. [3] und Zeonex und Zeonor von Zeon Chemical LP [4]. Je nach Cyclomonomer und dem zu ihrer Synthese verwendeten Polymerisationsverfahren werden leicht unterschiedliche Materialien angeboten [5]. Zwei verschiedene Polymerisationsverfahren werden verwendet, die Kettencopolymerisation für Cyclomonomere mit Ethylen (Topas und Apel) und die ringöffnende Metathese-Polymerisation von Cyclomonomeren mit anschließender Hydrierung (Arton, Zeonex und Zeonor), wie in Abbildung 1 gezeigt.

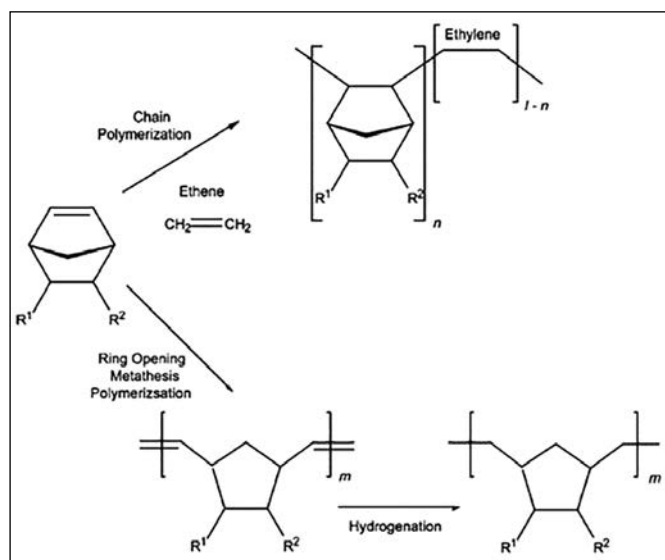


Abbildung 1: Typische Polymerisationsschemata und verallgemeinerte chemische Strukturen für COPs [5]

Da die ersteren Polymere aus mehr als einer Art von Monomer bestehen, werden sie gewöhnlich als Cycloolefin-Copolymere (COCs) bezeichnet, während die letzteren üblicherweise als COPs bezeichnet werden. Sowohl COP als auch COC werden oft als allgemeine Begriffe für die gesamte Gruppe verwendet.

Das für diese Untersuchung verwendete Material ZEONEX 690R ist ein Cycloolefin Polymer (COP). Dieser technische Kunststoff zeichnet sich durch „glasartige“ Transparenz, geringe Proteinaufnahme, hohe Reinheit, geringe Wasseraufnahme und ausgezeichnete Feuchtigkeitsbarriere aus. Damit eignet er sich für den Einsatz in Präzisions-spritzgussanwendungen wie Spritzen und anderen Medikamentenverabreichungsgeräten für die vorgefüllte Medikamentenlagerung. Mit einer hohen Glasübergangstemperatur von 136°C ist die Sterilisation mittels Dampf, Peroxid, Etylenoxid oder Gamma möglich. [4] Die verwendeten Probenkörper werden im Spritzgussverfahren hergestellt und besitzen die Form von Zugprüfstäben mit einer Stärke von 4 mm.

3 UKP-System

Zur Realisierung des Vorhabens wurde ein neuartiges Lasersystem aufgebaut. Die Laserquelle ist ein Piko-sekunden (< 10 ps) Laser (Novanta, Dart Picosecond Laser), der bei einer Wellenlänge von 1030 nm und einer Repetitionsrate bis zu 15 MHz arbeitet. Der Laser emittiert einen Gaußschen Strahl mit der Strahlqualität $M^2 = 1,1$ und einer hohen Pulsenergiestabilität von $< 1\%$ RMS. Die Strahlquelle ist über einen Strahlpfad mit integrierter Strahlweiche mit zwei Scanköpfen (Rhino, Precession Elephant von Novanta) verbunden. Der 2D-Scankopf Rhino ist besonders für flächige Bearbeitungen (z. B. Beschriften, Markieren oder Abtragen) geeignet. Für Bohr- und Schneidanwendungen zeichnet sich der 3D-Scankopf Precession Elephant mit höchster Präzision aus. Dabei kann der Laserstrahl in 5-Achsen (XYZ und zwei Neigungswinkel) bewegt werden. Die Einstellung der Prozessparameter und Ansteuerung der Strahlführung erfolgt über die Software InScript. Das Probenhandling erfolgt über ein Multiachssystem der Firma Aerotech. Die Basis bildet ein XY-Tisch, welcher aus zwei ECO165LM Linearachsen besteht, darauf ist eine Z-Achse (PRO165SV) montiert, welche einen Hub von 20 mm ermöglicht. Nach Bedarf kann eine Rotationsachse (ADRS100) ergänzt werden, die eine Bearbeitung, senkrecht zur Rotationsachse, ermöglicht. Die Ansteuerung aller Achsen erfolgt über einen Multi-Axis Motion Controller Ensemble EpaqMR. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

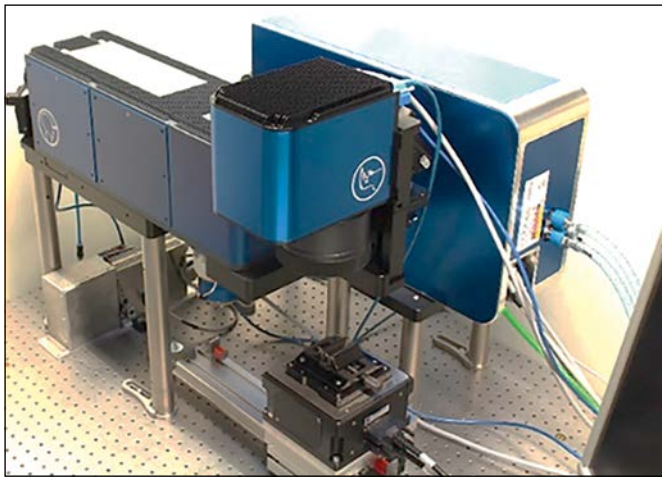


Abbildung 2: UKP-System Aufbau

4 Verfahren

Erstes Teilziel des Projektes ist es, mittels UKP Laserbearbeitung transparente Kunststoffe zu markieren und abzutragen, um eine Beschriftung mit hohem Kontrast zu erzeugen. Beim Lasermarkieren werden Kunststoffbindungen aufgebrochen und somit der Kohlenstoff aus diesen Verbindungen freigelegt.

4.1 Absorption

Die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Kunststoff ist abhängig vom Absorptionsverhalten des Werkstoffes. Wie in Abschnitt 3 beschrieben, bestehen die Hauptbindungen des ZEONEX 690R zunächst aus Bindungen zwischen Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen (C-H). Zum Aufbrechen dieser Verbindung muss die Bindungsenergie überwunden werden, welche 413 kJ/mol beträgt [6]. Entspricht die Photonenenergie der Bindungsenergie, tritt eine anormale Dispersion auf, d. h. eine maximale Absorption. Über die Planck'sche Beziehung zwischen Energie und Frequenz berechnet sich hier für die C-H-Bindung eine korrespondierende Wellenlänge von 289 nm. Dies würde einer Anregung mit UV-Strahlung entsprechen. Die Emission des verwendeten UKP-Systems beträgt jedoch 1030 nm, was darauf hinweist, dass hier nichtlineare Absorptionsmechanismen auftreten.

4.2 Laserparameter

Wichtige Laserparameter für die Polymerbearbeitung sind die Laser Fluenz und Linienenergie. Laser Fluenz ist die durchschnittliche Energie, die pro Flächeneinheit (Laserspot) von einem einzelnen Puls in die Probenoberfläche eingebracht wird. Diese ergibt sich unmittelbar aus der Pulsenergie und der Spotfläche. Für eine flächige Bearbeitung ist die Betrachtung der Gesamtenergie pro Linie (Linienenergie) F_{line} bedeutsamer, da dieser auch den Einfluss der Scangeschwindigkeit sowie der Pulsfrequenz berücksichtigt. Eine Veränderung der Scangeschwindigkeit

beeinflusst ebenso wie die Pulsfrequenz auch die Pulsüberlappung. Die Linienenergie bezieht daher den gesamten Energieeintrag entlang einer Scanlinie auf die, aufgrund der Pulsüberlappung, mehrfach bestrahlte Fläche. Da der Linienabstand in diesem Parameter nicht enthalten ist, wird ein möglicher Wärmestau zweiter Ordnung nicht berücksichtigt. Die Linienenergie kann über folgenden Zusammenhang beschrieben werden:

$$F_{line} = \frac{F * w_0 * f_{seed}}{v_s} \quad 4.1$$

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Prozessparameter zusammengestellt.

Tabelle 1: Übersicht wichtiger Prozessparameter

Parameter	Formelzeichen	Einheit	Bearbeitungsbereich
Fluenz	F	J/cm ²	10 – 51
Pulsenergie	E_{puls}	J	$5,15 \cdot 10^{-4}$ – $2,57 \cdot 10^{-3}$
Spotfläche	A_{spot}	cm ²	$5,03 \cdot 10^{-5}$
Linienenergie	F_{line}	J/cm ²	2 – 410
Fokusbereich	w_0	mm	0,08
Pulsfrequenz	f_{seed}	Hz	$1 \cdot 10^4$
Scangeschwindigkeit	v_s	mm/s	100 – 2000

5 Ergebnisse

Neben makroskopischen Aufnahmen werden die Proben unter dem Stereomikroskop 2000–C der Zeiss AG mit der Kamera DFC 295 der Firma Leica untersucht. Dieses besitzt eine stufenlose Einstellung der Vergrößerung zwischen 6,5x und 50x. Die Auswertung der Abtragtiefe erfolgt mit dem Auflichtmikroskop BX60M von Olympus und der Kamera DMC2900 von Leica. Die Dokumentation, Bearbeitung und Archivierung erfolgte mit der Bildanalysesoftware IMS Client V17Q4 von Imagic.

Das Parameterfeld, in dem unterschiedliche Laserparameter getestet und untersucht werden, wird zunächst auf die Variation von lediglich zwei unabhängigen Parameter beschränkt, die Laserleistung (P_L 100% – 20%) und die

Scangeschwindigkeit (v_s 100 mm/s – 2000 mm/s). Der Bearbeitungsabstand (Fokus), die Pulsfrequenz (10 kHz) sowie der Linienabstand (Δy 0,02 mm) werden konstant gehalten. Diese Versuchsreihen liefern die Schädigungsschwellen und Grenzenenergien.

Um bei den nachfolgenden Markierungsversuchen (Färbung) die Oberfläche der Bauteile nicht zu beschädigen, wird die Fokusslage in die Mitte des Bauteils gelegt (2 mm defokussiert), sodass die Laserfluenz auf der Oberfläche unterhalb der Abtragschwelle liegt.

Die anschließende Versuchsreihe mit methodischer Variation der Laserleistung und Scangeschwindigkeit ergaben für die Linienenergie den Bearbeitungsbereich von 2 J/mm² – 410 J/mm². Abbildung 3 zeigt 12 Parameter (blaue Punkte) mit unterschiedlichen Linienenergien. Für die Parameter 10 – 12 (orange Punkte) wird die Anzahl der Überfahrten erhöht (n 20, 60, 100), daher steigt hier der Energieeintrag pro Fläche an.

Die variierten Linienenergien können in drei grundsätzliche Bereiche (rote Linien) eingeteilt werden. Materialabtrag, Bereich 1, wird durch hohe Energiedichten bereits bei Einzelfahrten erreicht. Im zweiten Bereich (Parameter 4 – 6) reicht die eingebrachte Energie nicht aus Material abzutragen, jedoch entstehen oberflächliche Verfärbungen und Risse. Die Parameter 7 – 9 ermöglichen eine Verfärbung des Kunststoffes innerhalb des Bauteils ohne Schädigung der Oberfläche. Durch weitere Reduzierung der Linienenergie auf 2 J/mm² (Parameter 10 – 12) wird bei einfacher Überfahrt keine sichtbare Veränderung der Struktur oder Farbe festgestellt. Jedoch kann durch mehrfache Überfahrt eine Kontrastierung erzielt werden.

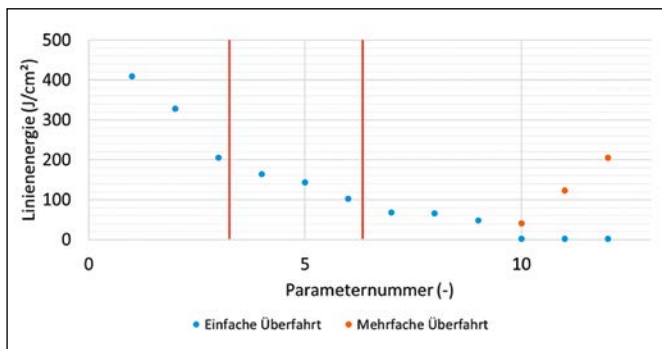


Abbildung 3: Linienenergie-Übersicht Parametervariation

Abbildung 4 zeigt Markierungsergebnisse ausgewählter Parameter (1, 10, 11 und 12). Parameter 1 liefert deutlich abgetragene Strukturen, wohingegen die Parameter 10 – 12 von links nach rechts Markierungen mit unterschiedlichem Kontrast zeigen.

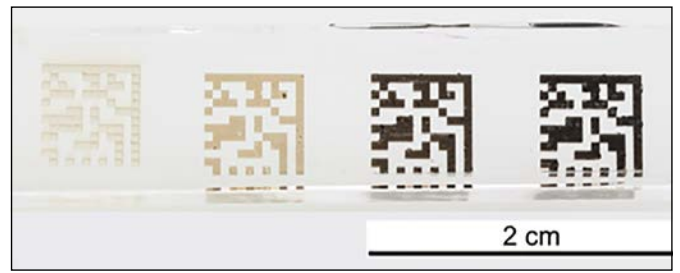


Abbildung 4: Übersicht Parameter 1, 10, 11, 12

In Abbildung 5 sind Detailaufnahmen der ausgewählten Parameter dargestellt. Für Parameter 1 ist deutlich eine abgetragene Struktur mit markanten Übergängen zwischen den einzelnen quadratischen Flächen erkennbar. Die drei Parameter zum Markieren zeigen keine Beschädigung der Oberfläche, jedoch ist mit steigender Anzahl der Überfahrten (n 20 - 60 - 100) eine zunehmende Schädigung (Blasenbildung) im Inneren des Bauteils zu erkennen. Es wird angenommen, dass durch die eingekoppelte Energie in der Tiefe thermisch Bindungen wie die C-H-Bindung gebrochen werden und in der Folge Gasblasenbildung eintritt. Die Emission des verwendeten UKP-Systems mit 1030 nm ermöglicht es, Markierungen unterhalb der Oberfläche zu realisieren, ohne die Oberfläche zu beschädigen. Dies ist möglich, da die Wellenlänge, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, nicht in den Absorptionsbereich der vorhandenen Werkstoffbindungen liegt.

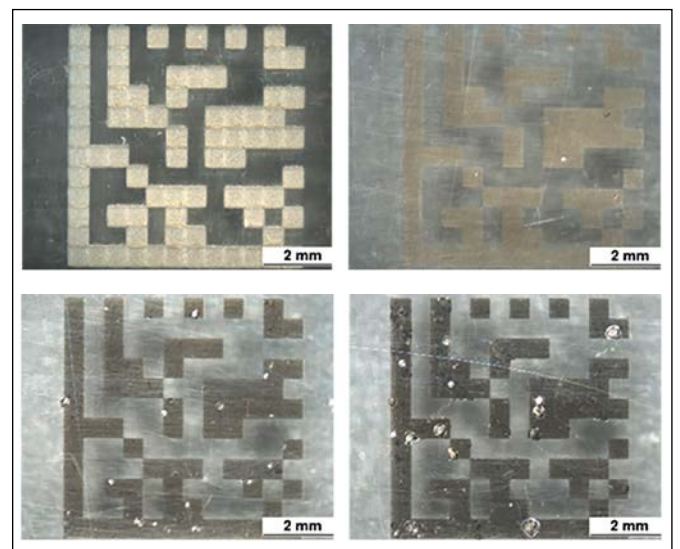


Abbildung 5: Detailaufnahme Parameter 1, 10, 11, 12

6 Ausblick

Im weiteren Verlauf des Projektes werden weitere Parameterstudien am ZEONEX 690R im Parameterbereich 3 durchgeführt, um den Bearbeitungsprozess hinsichtlich einer Reduktion der Blasenbildung, der Verbesserung der Lesbarkeit und in Bezug auf die Prozessgeschwindigkeit zu optimieren.

Darüber hinaus werden zukünftig auch andere Materialien und Bearbeitungsprozesse in den Fokus der Untersuchungen rücken, z. B. das Strukturieren von Stahloberflächen, die beim Spritzguss in Kunststoff abgeformt werden. Neben einer rein geometrischen Gestaltung werden Oberflächenstrukturen auch metallurgisch modi-

fiziert, um eine reibungssenkende Wirkung zu erreichen und die Strukturauflösung im Bauteil zu erhöhen. Konventionelle Methoden müssen hier auf umweltschädliche Gleitmittel zurückgreifen und sind in der Strukturgröße nach unten hin begrenzt.

Referenzen:

- [1] Topas Advanced Polymers: TOPAS COC Polymers. Online. <https://topas.com/products/topas-coc-polymers> (abgerufen am 17.08.2021).
- [2] Mitsui Chemicals America: APEL Cyclo Olefin Copolymer (COC). Online. <https://us.mitsuichemicals.com/service/product/apel.htm> (abgerufen am 17.08.2021).
- [3] Japan Synthetic Rubber: ARTON Resin for Injection Applications. Online. https://www.jsr.co.jp/jsr_e/products/op/arton.html (abgerufen am 17.08.2021).
- [4] Zeon Chemicals: Pharmaceuticals. Online. <https://www.zeonex.com/pharmaceuticals.aspx.html#products> (abgerufen am 17.08.2021).
- [5] Shin, J. Y., Park, J. Y., Liu, C., He, J., & Kim, S. C. (2005). Chemical structure and physical properties of cyclic olefin copolymers (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 77(5), 801-814.
- [6] Neufingerl, F., Urban, O., & Viehhauser, M. (2006). *Chemie: allgemeine und anorganische Chemie; organische Chemie*. Jugend & Volk. S. 47.

Projektpartner:

Gerresheimer Regensburg GmbH, Wackersdorf

Kontakt:



Thomas Simson, M.Sc.

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

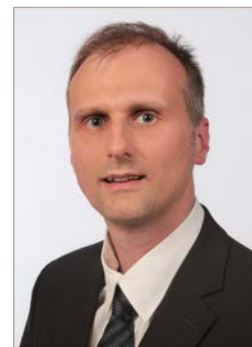
t.simson@oth-aw.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Koch

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

j.koch@oth-aw.de



Dr.-Ing. Bernhard Schmitt

Gerresheimer Regensburg GmbH
Oskar-von-Miller-Straße 6
92442 Wackersdorf

bernhard.schmitt@gerresheimer.com

Zusammenfassung

Die Steigerung der Ressourceneffizienz stellt eine wichtige gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar. Dabei sind Messgrößen für Technologien und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz ebenso vielfältig wie die Steigerung der Ressourceneffizienz selbst. Für unternehmerische und politische Entscheidungsprozesse stellen vergleichbare Messgrößen einen essentiellen Faktor dar. Mit diesem Hintergrund wurde eine Methodik, die ebenfalls für Ökobilanzen nutzbar ist, entwickelt, die den abiotischen Ressourcenverbrauch ganzheitlich messbar macht. Neben der Methodik selbst wird auch die Datengrundlage geologischer Vorkommen als Basis der Bilanzierung ebenso wie die Äquivalenzeinheit neu aufgestellt. Zusammenfassend werden hinsichtlich geologischer Aspekte der Verbrauch, die Ressourcenverfügbarkeit, der anthropogene Vorrat und die dissipativen Verluste, global betrachtet, berücksichtigt. Zusätzlich fließen acht sozio-ökonomische Aspekte als ein Co-Faktor in die Berechnung ein. Zu diesen zählen globale (z. B. Länderrisiko, Länderkonzentration) als auch regionale (z. B. Importabhängigkeit, regionale Bedeutung) Kenngrößen.

Abstract

The increase in resource efficiency is a challenge related to society as a whole. Measures for technologies and measures for the increase in resource efficiency are as diverse as increases in the resource efficiency themselves. For entrepreneurial and political decisions a comparability of these measures is very important. In this case a methodology was developed, which is usable for life cycle assessments, too. This methodology makes the a-biological consumption of resources measurable. The methodology themselves, the database of the geological deposit as base of the accounting and the equivalence unit will be new elaborated. At the end the geological aspect will take the consumption, the availability of the resource, the human-caused stocks and the dissipative losses in a global view into consideration. Additional eight socio-economic aspects as a co-factor contribute in the calculation. The socio-economic aspects includes global (e.g. country risk, integration of countries) and regional (e.g. dependence on import, regional importance) properties.

1 Einleitung

Ressourceneffiziente Arbeitsweisen ermöglichen es Unternehmen, Kosten, Importabhängigkeiten und die mit dem Rohstoffverbrauch verbundenen Umweltauswirkungen zu verringern. Anerkannte Strategien hierzu sind die generelle Verringerung des Ressourceneinsatzes zum Erreichen eines bestimmten Nutzens oder die Erhöhung des Nutzens aus einem gegebenen Ressourceneinsatz. In beiden Fällen steigt der Quotient – die Ressourceneffizienz – aus Nutzen zum dafür nötigen Aufwand an. Der Freistaat Bayern unterstützt in diesem Zusammenhang

die Entwicklung von Innovationen durch anwendungsorientierte Forschung im Bereich Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Für den Projektverbund ForCYCLE II [1], welcher durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert wird, werden im Projekt NetCYCLE II unter Federführung der OTH Amberg-Weiden geeignete Kennzahlen zur Bewertung und Vergleichbarkeit von Ressourceneffizienz erarbeitet. Ziel ist es hierbei, die in verschiedenen Einheiten erfassten Einsparungseffekte mittels einer aggregierten Kenngröße ähnlich dem Energieeffizienzlabel vergleichbar zu machen.

In einem ersten Schritt werden zunächst relevante Wirkungskategorien aufgestellt, zu denen beispielsweise der „Energieverbrauch“ oder das Treibhauspotenzial zählen. In einem zweiten Schritt – dem Fokus dieses Textes – wird im Speziellen auf die Wirkungskategorie des Ressourcenverbrauchs eingegangen, welcher weit weniger konsolidiert ist wie beispielsweise der des Treibhauspotenzials. Abschließend erfolgt eine gewichtete Aggregation zu einer oder wenigen Kennzahlen.

2 Bewertung des Ressourcenverbrauchs in Ökobilanzen

Für die Bewertung des Einflusses von Prozessen und Dienstleistungen auf mineralische Ressourcen in Ökobilanzen (LCA) stehen nach Sonderegger et al. [2] 33 Ansätze mit 27 unterschiedlichen Methoden zur Verfügung. Aufgrund bereits weitreichender Anwendung sind hieraus Methoden hervorzuheben, die den Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen adressieren, also den Prozess einer physischen Reduzierung der globalen Menge einer spezifischen Ressource [3]. Die bekannteste Methode dabei ist die des abiotischen Abbaupotenzials (engl. Abiotic Depletion Potential ADP), die erstmals durch Guinée [4] definiert wurde. Die Wirkungskategorie ADP setzt dabei den Verbrauch und die Ressourcenbasis eines nicht-energetischen Elements *i* mit einem Referenzelement, typischerweise Antimon, in Relation. Elemente mit einem engen Verhältnis aus Verbrauch und Ressourcenbasis zeigen dabei hohe, solche mit weitem Verhältnis hingegen niedrige Werte, Schneider et al. [5] beschreiben die um anthropogene Vorkommen als bereits geförderte Rohstoffmengen zum AADP (Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential) weiterentwickelte Wirkungskategorie.

2.1 Geologische Aspekte

Sowohl für ADP als auch AADP werden als Ressourcenbasis meist die in der Erdkruste, Wasser und Luft vorkommenden Rohstoffmengen genutzt, ausgehend von ihren globalen Konzentrationen in diesen Medien. Hierbei zeigt sich zwar eine grundsätzlich gute Datenverfügbarkeit, jedoch wird vollständig außer Acht gelassen, dass Elemente z. B. ab bestimmten Tiefen in der Erdkruste (z. B. >4.000 m) technisch sowie ökonomisch nicht förderbar sind und dies auch mindestens in den kommenden Jahrzehnten nicht sein werden. Entsprechend kann diese Betrachtung eine zu große „gefühlte“ Sicherheit hinsichtlich der Versorgung mit Rohstoffen ergeben. Alternativ sind die Größen „Reserven“ und „Ressourcen“ zu nennen. Nach Definition des USGS [6] fließen in beide Größen die Wirtschaftlichkeit einer Förderung ein, jedoch ist diese bei Reserven stark, bei Ressourcen hingegen schwach ausgeprägt. Um in der Betrachtung geologischer Aspekte kurzfristige ökonomische Ereignisse ausblenden zu können, wird daher die Nutzung von Ressourcen als Basis

vorgeschlagen. Gegenüber der Anzahl an Datensätzen (*n* = 88, ein Datensatz steht für ein Element), die zu Konzentrationen in Erdkruste, Wasser und Luft zur Verfügung stehen, können bei der Betrachtung von Ressourcen 85 % (*n* = 62/88) dieser und hinsichtlich versorgungskritischer Metalle [7] sogar 90 % (*n* = 38/42) dargestellt werden. Hier fehlen lediglich Werte zu den Elementen Bor, Bismut, Magnesium und Niob.

Für die Betrachtung geologischer Aspekte ist final eine erweiterte Form des AADP entwickelt worden, welche dissipative Verluste elementspezifisch berücksichtigt. In früheren Methoden wurden dissipative Verluste derweil gar nicht oder aufgrund pauschaler Annahme nur ungenügend berücksichtigt. Zusammenfassend stellen die Gleichungen 1 und 2 die entwickelten Terme zur Kalkulation geologischer Aspekte dar

$$AADP_i = \frac{P_i}{(R_i + AS_i - D_i)^2} \times \frac{(R_{ref} + AS_{ref} - D_{ref})^2}{P_{ref}} \quad (1)$$

$$AADP = AADP_i \times m_i \quad (2)$$

mit den für jedes Element *i* und Referenzelement *ref* spezifischen Kenngrößen Extraktionsrate *P*, Ressourcen *R*, anthropogener Vorrat *AS* sowie dissipativen Verlusten *D*. *m* ist die Masse des in der LCA bilanzierten Aufwands des jeweiligen Elements.

Gegenüber der in der Wissenschaft weitläufig genutzten Referenzeinheit Antimon-Äquivalent wird eine wirtschaftlich und gesellschaftlich besser verständliche, da gebräuchlichere Einheit empfohlen. Hierbei zeigt sich insbesondere Eisen als ideal anwendbares Element, welches durch die alltägliche Nutzung nicht nur omnipräsent ist, sondern dessen Datenbasis äußerst fundiert und durch zahlreiche Messungen regelmäßig validiert wird. Gegenüber dem sehr seltenen Element Antimon bewirkt das gut verfügbare Eisen noch eine weitere Betrachtungsveränderung: Genauso wie beim gesellschaftlich akzeptierten CO₂-Äquivalent für die Bewertung des Treibhauspotenzials ergeben sich bei fast allen Elementen Werte größer Eins (Ausnahmen sind K, P und S), welche leichter interpretierbar sind als besonders kleine Werte (z. B. <10⁻⁵), welche durch Rundungsfehler zudem oft fehlinterpretiert werden.

2.2 Sozioökonomische Aspekte

Hinsichtlich der Nutzung sozioökonomischer Aspekte beim Ressourcenverbrauch bestehen Studien und Betrachtungen auf unterschiedlichstem regionalspezifischen Level. Beispielhaft seien transnational die Studien der Europäischen Kommission zur Kritikalitätsbewertung biotischer und abiotischer Materialien von 2011, 2014, 2017 und 2020 (vgl. [7]), auf nationaler Ebene die jährlichen Berichte

des US-Amerikanischen geologischen Dienstes USGS (vgl. [6]) oder die Bewertungen der Deutschen Rohstoffagentur DERA (vgl. [8]) sowie auf Landesebene die Bewertungen der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft VBW e.V. (vgl. [9]) zu nennen. Auch im Rahmen ökobilanzieller Betrachtungen wurden entsprechende Methoden entwickelt, z. B. die ESP- oder ESSENZ-Methode der TU Berlin [10]. Aus der Zusammenstellung aller genannten sowie weiterer Methoden wurde ein Set aus vier quantitativen und vier qualitativen Kriterien erstellt, welches die entsprechenden Werte elementspezifisch darstellt:

Quantitative Kriterien:

- Länderspezifisches Risiko (der Bergwerksförderung/Produktion)
- Länderspezifische Konzentration (der Bergwerksförderung/Produktion)
- Preisrisiko* (Preisveränderung und -volatilität)
- Importabhängigkeit

* als gleitendes Mittel aus dem letztverfügbaren Jahr (z. B. 2020) gegenüber dem Mittelwert der fünf Vorjahre (zum Beispiel: 2015 – 2019)

Qualitative Kriterien:

- Bedarf durch Zukunftstechnologien
- Substituierbarkeit
- Recyclingfähigkeit (als End-of-Life recycling input rate)
- Regionale Bedeutung

Die acht Kriterien c der sozio-ökonomischen Aspekte SE sind dabei jeweils mit einem Gewichtungsfaktor w belegt, wobei die Summe aller Faktoren 1 ergibt (Gleichung 3):

$$SE = \sum_i C_i \times w_i \quad SE = \{0 \dots 1\}; i: \{0 \dots 1\} \quad (3)$$

2.3 Ressourceneffizienzpotenzial

Das Ressourceneffizienzpotenzial stellt das Summenprodukt aus geologischen und sozioökonomischen Aspekten dar, welche mit entsprechenden Gewichtungsfaktoren m und n in den Term der Gleichung 4 einfließen:

$$RI_{m,n} = m \times AADP_i + n \times AADP_i \times SE \times 2 \quad m + n = 1 \quad (4)$$

Für die beiden Gewichtungsfaktoren besteht kein natürlicher und/oder kausaler Zusammenhang, weshalb eine dem Anwendungsfall spezifische Gewichtung gewählt werden sollte. Für allgemeine Zwecke wird eine Gewichtung von $m: 0,7$ und $n: 0,3$ empfohlen, die die Relevanz der geologischen Verfügbarkeit stärker berücksichtigt.

Die geologischen Aspekte AADPi werden auch im Produkt des sozioökonomischen Terms berücksichtigt, da die normierten Aspekte der SE lediglich Werte von 0 bis 1 annehmen können und ohne die Verrechnung mit den geologischen Aspekten der sozioökonomische Summand folglich auch nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Bei sehr großen Werten für die geologischen Aspekte, die aus der gängigen Ökobilanzmethodik abgeleitet und demzufolge im Wertebereich nach oben nicht begrenzt sind, würden die sozioökonomischen Aspekte keinen nennenswerten Einfluss auf das Ressourceneffizienzpotenzial nehmen. Zudem wurde bei den sozioökonomischen Faktoren der Zahlenfaktor 2 integriert, der dazu dient, dass diese Faktoren das Ressourceneffizienzpotenzial sowohl erhöhen als auch verringern können.

Vereinfacht ausgedrückt kennzeichnen die in Eisen-äquivalenten ausgedrückten geologischen Aspekte die Knappheit eines Elementes im Vergleich zu Eisen. Bei mittleren sozioökonomischen Verfügbarkeitsrisiken ($SE = 0,5$) ergibt sich dieser Wert auch als Ressourceneffizienzpotenzial. Ungünstige sozioökonomische Faktoren können diesen Basiswert um bis zu 30 % anwachsen lassen, während sich günstige sozioökonomische Aspekte in einer Verringerung um höchstens 30 % auswirken.

In Summe berücksichtigt die beschriebene Methode hinsichtlich geologischer Aspekte global betrachtet den Verbrauch, die Ressourcenverfügbarkeit, den anthropogenen Vorrat und die dissipativen Verluste. Im Rahmen der sozioökonomischen Aspekte werden darüber hinaus acht Kriterien betrachtet, die sowohl globale (z. B. Länderrisiko, Unternehmenskonzentration) als auch regionale Verhältnisse (z. B. Importabhängigkeit, regionale Bedeutung) widerspiegeln.

3 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Die entwickelte Methodik stellt eine in Ökobilanzen nutzbare Möglichkeit zur ganzheitlichen Bewertung des Einflusses von Prozessen und Dienstleistungen auf mineralische Ressourcen dar. Der ganzheitliche Ansatz spiegelt sich dabei sowohl in Form einer einzigen aggregierten Kennziffer des Ressourceneffizienzpotenzials wider, als auch durch die vergleichsweise hohe Datenmenge, die für diese Darstellung notwendig ist und aus unterschiedlichsten Quellen stammt. Diese Herausforderung stellt dabei gleichzeitig einen Forschungsbedarf für zukünftige Arbeiten dar, da selbst für einige wirtschaftlich wichtige Elemente wie Calcium, Magnesium oder Mangan bislang nur unvollständige Daten vorliegen. So fehlen für die aufgeführten Elemente beispielsweise verlässliche Berechnungen der Ressourcen sowie, insbesondere aufgrund der vielfältigsten Darbietungsformen der beiden Erdalkalielemente, zahlreiche Daten für soziopolitische Aspekte.

Während sich für die geologischen Aspekte ein durch den Anwender nicht beeinflussbarer Wert ergibt, sind für die Gewichtungsfaktoren der sozioökonomischen Werte an dieser Stelle noch keine numerischen Werte festgelegt. Diese werden im weiteren Projektverlauf jedoch eruiert und in Dialogen mit Wissenschaft und Wirtschaft validiert.

Wie eingangs aufgeführt, ist die Betrachtung des Ressourcenverbrauchs nur ein Baustein auf dem Weg zu einer der respektive wenigen Kennzahlen, welche weit-

reichend für politische und/oder unternehmerische Entscheidungsprozesse nutzbar gemacht werden können. Beispielsweise ließen sich die wichtigsten Ergebnisse einer vergleichenden Ökobilanzierung in den Kategorien Treibhauspotenzial, Ressourceneffizienzpotenzial und nicht-erneuerbare Energienutzung parallel darstellen. Umweltrelevante Wirkungskategorien könnten mit weiteren Kategorien ebenfalls in einer eigenen aggregierten Kennzahl angegeben oder – je nach Anwendungsfall – als Einzelkennwerte ausgegeben werden.

Referenzen:

- [1] Mocker, M., Hense, P, Neidel, J (2018) Projektverbund zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft – ForCYCLE II, in: Pomberger, R. et al. (Hrsg.): 14. Recy & DepoTech-Konferenz 2018, Montanuniversität Leoben, Leoben 2018, S. 381 - 386.
- [2] Sonderegger, T.; Berger, M.; Alvarenga, R.; Bach, V.; Cimprich, A.; Dewulf, J.; Frischknecht, R.; Guinée, J.; Helbig, C.; Huppertz, T.; Jolliet, O.; Motoshita, M.; Northey, S.; Rugani, B.; Schrijvers, D.; Schulze, R.; Sonnemann, G.; Valero, A.; Weidema, B. P.; Young, S. B. (2020) Mineral resources in life cycle impact assessment – part I: a critical review of existing methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25, 784 - 797.
- [3] Drielsma, J. A.; Russel-Vaccari, A. J.; Drnek, T.; Brady, T.; Weihed, P.; Mistry, M.; Simbor, L. P. (2016) Mineral resources in life cycle impact assessment – defining the path forward. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 85 - 105.
- [4] Guinée, J. B. (1995) Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products, with a case study on margarines. Proefschrift, Rijksuniversiteit te Leiden, 02. März 1995.
- [5] Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M. (2015) Abiotic resource depletion in LCA – background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, 709 - 721.
- [6] U.S. Geological Survey (USGS) (2021) Mineral commodity summaries 2021. Washington.
- [7] Blengini, G. A.; EL Latunussa, C.; Eynard, U.; Torres de Matos, C.; Wittmer, D.; Georgitzikis, K.; Pavel, C.; Carrara, S.; Mancini, L.; Unguru, M.; Blagoeva, D.; Mathieux, F.; Pennington, D.; European Commission (EC) (2020) Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final report, Brussels.
- [8] Deutsche Rohstoffagentur (DERA) (2021) DERA-Rohstoffliste 2021. Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen – Potenzielle Preis- und Lieferrisiken. DERA Rohstoffinformationen 49, Berlin.
- [9] Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e.V. (VBW) (2020) Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft. München
- [10] Bach, C.; Berger, M.; Henßler, M.; Kirchner, M.; Leiser, S.; Mohr, L.; Rother, E.; Ruhland, K.; Schneider, L.; Tikana, L.; Volkhausen, W.; Walachowicz, F.; Finkbeiner, M. (2016) Integrated method to assess resource efficiency – ESSENZ. *Journal of Cleaner Production* 137, 118 - 130.

Projektpartner:

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg

Fördergeber:



Kontakt:



Prof. Dr. Mario Mocker

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

m.mocker@oth-aw.de



Markus Bär, M.Eng.

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

m.baer@oth-aw.de

Zusammenfassung

Die komplexen Eigenschaften der Pseudokapazität, typische Ausfallmuster praktischer Superkondensatoren und die Langzeitstabilität von Elektrolytsystemen und Kohlenstoffmaterialien werden unter phänomenologischen Aspekten kritisch beleuchtet. Unerwünschte Materialänderungen an den Elektroden, überraschende chemische Reaktionen und die Rolle von Wasser wurden in einem mehrjährigen Lebensdauererprobungstest untersucht.

Abstract

The complex properties of the pseudocapacitance, typical fault patterns of so-called supercapacitors, and the long-term stability of electrolyte systems and carbon materials are critically examined under phenomenological aspects. Unwanted material changes at the electrodes, surprising chemical reactions, and the role of water have been observed over several years in the life test.

1 Introduction

Electrochemical double-layer capacitors (EDLC) [1, 2] use the capacitive properties of the solid-liquid interface between an electronic conductor and an ionically conductive material for energy storage. The so-called double-layer [3] develops as a result of electrochemical charge-transfer and diffusion processes at the phase boundary between an electron conductor (electrode) and a liquid ion conductor (electrolyte). Double layer capacitors are commercially available with capacities of 10 F up to 5000 F, and specific energies around 4.5 Wh/kg. Specific outputs of 800–1200 W kg⁻¹ are sufficient for most technical applications [4]. Mainly, activated carbon electrodes are wound up together with the separator, inserted into a cylindrical metallic housing and soaked in an organic electrolyte solution.

The fundamental understanding of the charge-discharge processes at porous carbon electrodes is all but simple. Still the ideas about the physics and chemistry of electrically conductive solid-liquid phase boundaries are still vague. This work gives insights into the aging phenomena during service life tests [5, 6, 7] and the instrumental-analytical investigation on materials and residues [8].

2 The Phenomenon of pseudocapacitance

The capacitance of electrochemical capacitors can be determined under constant load according to an IEC 62576 recommended method. As shown in Figure 1, the more or less linear capacitive voltage drop, following the ohmic voltage drop immediately after switching-on the current, reflects the apparent capacitance of the system. However, the truth is more complex: Capacitance is not a constant quantity, but depends on the applied voltage, current and frequency, the ambient temperature, the ionic strength of the electrolyte system, and the overvoltage caused by kinetic inhibitions of the electrode processes and the ion adsorption in the electrode pores. Therefore, the quantity $C(\omega, U, T, \dots)$ is called pseudocapacitance. The electrostatic double-layer is superimposed by battery-like processes, which behave like lossy capacitances. Electric charge does not change proportionally to the applied voltage, since the solvent molecules in the dipole layer are constantly reorienting themselves, while ions continuously adsorb and desorb, and excess charges shield the attractive forces of the electrode surface in the diffuse double layer. As a result, pseudocapacitance is a differential quantity: $C = dQ/dU$.

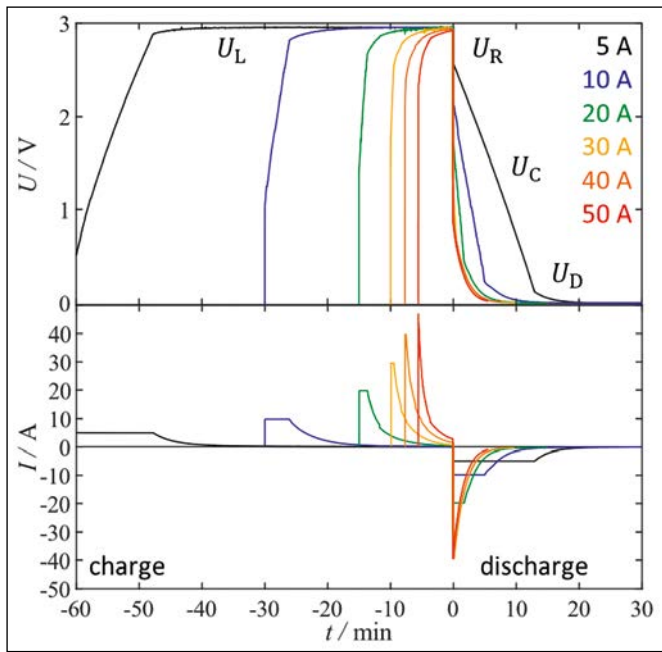


Figure 1: Constant current charge-discharge characteristics of a supercapacitor (LS Mtron, 350 F, 3 V). Ohmic voltage drop U_R , capacitive voltage drop U_C , depletion of the capacitor U_D .

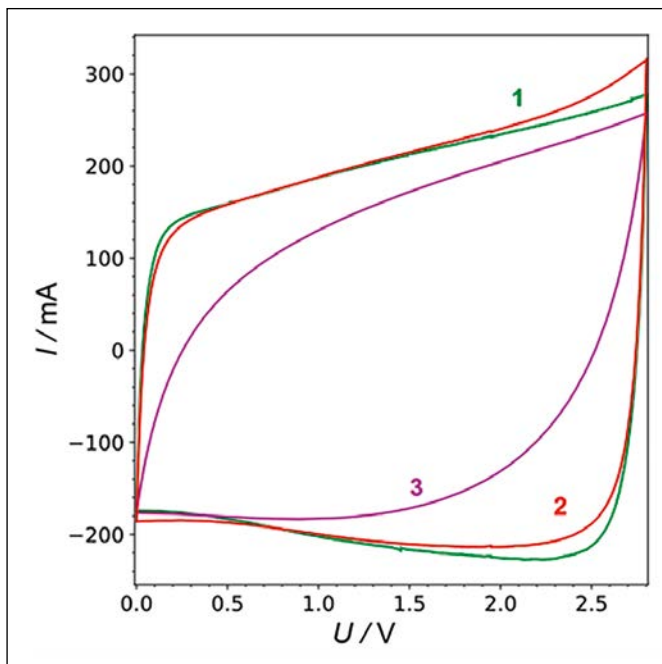


Figure 2: Deformation of the cyclic voltammogram of 50 F/2.7 V supercapacitors by thermal aging after 100 days: 1 new, 2 60°C moist heat, 3 90°C dry heat.

Electrochemical techniques that span different time domains, from microseconds to several minutes, yield different capacitance values for the very same supercapacitor. Constant current discharge and slow transient techniques capture better the slow battery-like reactions at the porous “inner” electrode surface [9]. We prefer cyclic voltammetry to measure the available capacitance and state-of-health of a supercapacitor. In Figure 2, the voltammetric charge Q is the area under the more or less rectangular current-voltage curve, and better than any other measure it reflects the actual ability for energy storage.

$$C = \frac{Q}{\Delta U} = \frac{1}{v} \int_0^{\Delta U} I(U) dU \approx \frac{\bar{I}}{dU/dt} \quad (1)$$

The scan rate ($v = dU/dt$) is chosen in the range of 20 mV/s. The voltage window ΔU is usually between open-circuit and the rated voltage of the capacitor.

Impedance spectroscopy reflects the capacitance of the “outer” electrode surface, while pore diffusion is “frozen”. In the complex plane (Figure 3), the resistances of electrolyte, porous active material and electrode processes can be distinguished. Pseudocapacitance can easily be calculated from the ohmic resistance R (real part) and reactance X (imaginary part) of the measured impedance [10]. At high frequencies, the leakage resistance of the supercapacitor may be neglected

$$C(\omega) = \frac{-X}{\omega [R^2 + X^2]} \approx \frac{-1}{\omega X} \quad (2)$$

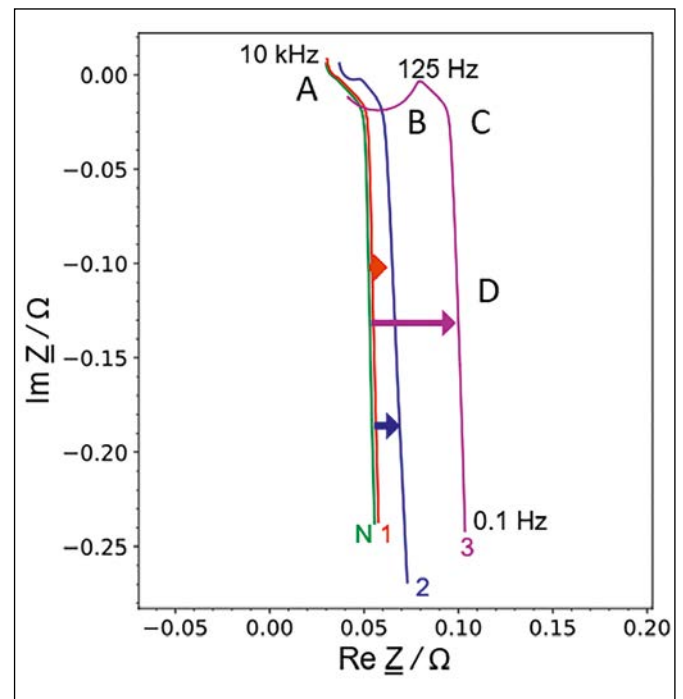


Figure 3: Impedance spectra of supercapacitors (10 F, 2.7 V) during aging for 100 days: N new, 1 60°C damp heat, 2 overvoltage (3 V), 3 90°C dry heat. A electrolyte and contacts, B adhesion layer, C electrolyte-filled grain boundaries, D pore diffusion.

3 Failure analysis and life time estimation

Double-layer capacitors can be operated under rigorous conditions for many years until they become unusable due to a gradual increase in internal resistance and loss of capacity. By the help of Principal Component Analysis (PCA), we examined more than thousand new and old capacitors of different manufacturers during a 100-day aging test. In Figure 4, the components PC1 and PC2 represent 83 % and 17 % of total statistical variance;

they are functions of six properties: R_s resistance at the intersection with the real axis in the Nyquist plot, ohmic resistance at 1 kHz, 1 Hz and 0.1 Hz, pseudocapacitance at 0.1 Hz, and voltammetric capacitance. The statistical connexion of the so-called charge matrix shows that PC1 is mainly determined by $R(1\text{ Hz})$ and $R(0.1\text{ Hz})$, while PC2 depends strongly on voltammetric capacitance (0.901). Other variables such as mass and water content do not help differentiate the samples. This is shown by the cross-validation “Leave-One-Out”, in which sample by sample is removed from the data record. Indeed, the measured increase of resistance and fading of capacitance reliably reflect the state-of-health of a supercapacitor.

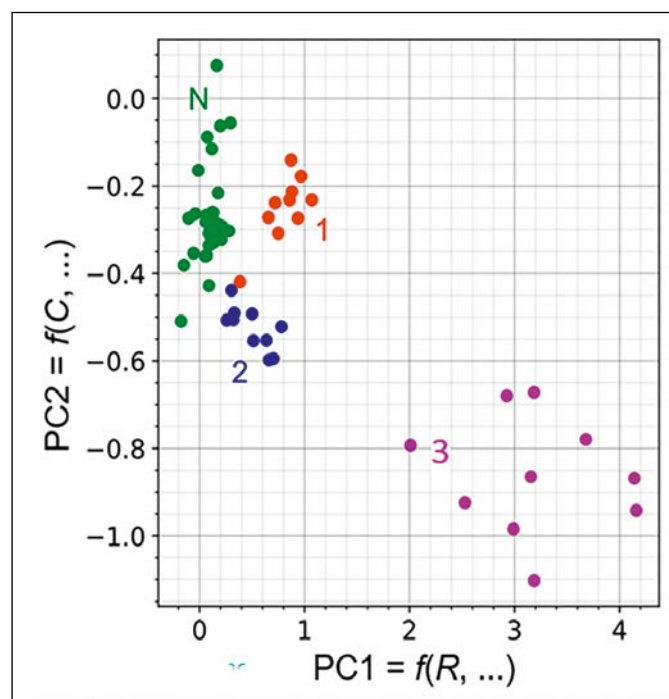


Figure 4: Principal component analysis (PCA) after aging of 100 F/2.7 V supercapacitors for 100 days: N thirty new samples, 1 ten samples 65°C moist heat, 2 overvoltage (3.0 V), 3 90°C dry heat.

Commercial double-layer capacitors withstand brief adverse environmental conditions such as excessive temperature and voltage. Capacitance drops in a fast, initial step and a slow exponential step, whereas resistance increases approximately linearly with time. To date there is no generally valid prediction model for the long-term aging behavior of supercapacitors. There are big differences between manufacturers. In the case of acetonitrile types, after a few hours at ambient temperatures of 120°C, a marked shrinkage of the capacitor mass occurs due to the evaporating electrolyte solution. If there is no safety valve or an intentional leak, the capacitor housing swells and internal pressure builds up. Failure at unsuitable temperature and voltage stresses is mainly attributed to the peeling of the carbon layer from the aluminum substrate and destruction of the polymer binder.

With constant-current discharge, the slope of the voltage-time curve becomes flatter with increasing age of

the capacitor. Mechanical detachment of the activated carbon layer from the support creates a less conductive intermediate layer, which causes an additional high-frequency arc in the impedance spectrum and a hump in the discharge curve. Aluminum is lost at the negative electrode by corrosion, while CF_2/CF_3 species from the destroyed polymer binder are incorporated at the same time. In long-term tests, the electrodes become inflexible and brittle on both sides. The conductive carbon black particles agglomerate, and the pore structure of the carbon electrode collapses. The anode (positive electrode) ages faster in acetonitrile, and the negative electrode tends to overcharge; in propylene carbonate, the cathode ages faster. With continuous cycling, the positive electrode takes up almost the entire voltage window, while the voltage drop on the negative electrode becomes smaller and smaller. Operating voltages above the nominal voltage lead to the decomposition of the electrolyte, a loss of active electrode surface and pore volume of the carbon material.

In supercapacitors that have been operated in moist heat for a long time, the water content gradually increases. Obviously, water vapor from a hot environment can migrate through the seals into the capacitor under certain circumstances. However, water seems to be removed from the can again during long-term operation in dry heat (90°C) or temporary electrolyte decomposition by over-voltage.

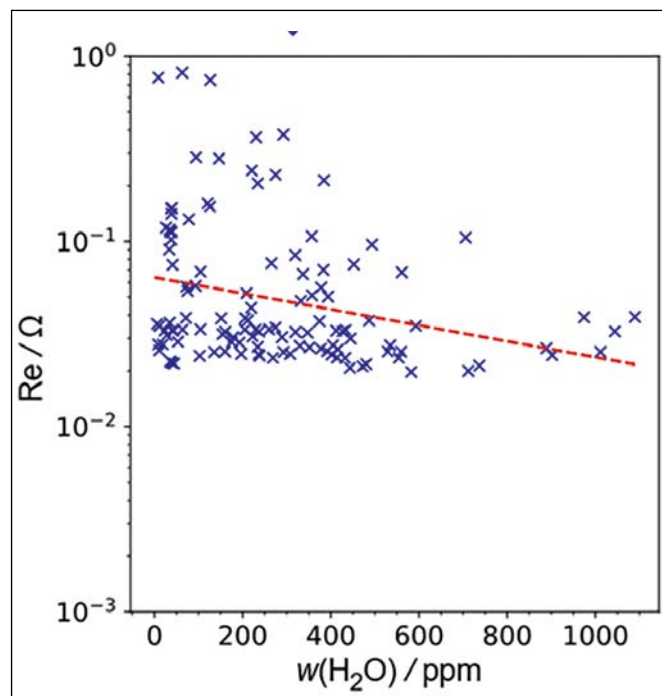


Figure 5: Electrolyte resistance against the water content in new and old supercapacitors of various types and manufacturers after aging tests in dry and humid environments.

We examined the impedance spectra with respect to the water content of almost 1400 new and used supercapacitors of different manufacturers. The charge-transfer re-

sistance at medium frequencies shows a good correlation with aging, especially in hot atmosphere. The influence of the penetrating water becomes clear through the slight improvement of electrolyte conductivity (Figure 5). The increase in capacitor mass due to the penetration of water is barely noticeable. The slope of diffusion impedance at low frequencies shows an unclear linear correlation with the water content. From this we conclude that water in the supercapacitor mainly influences the measured electrolyte resistance and the voltage window, while the influence on pore diffusion is small.

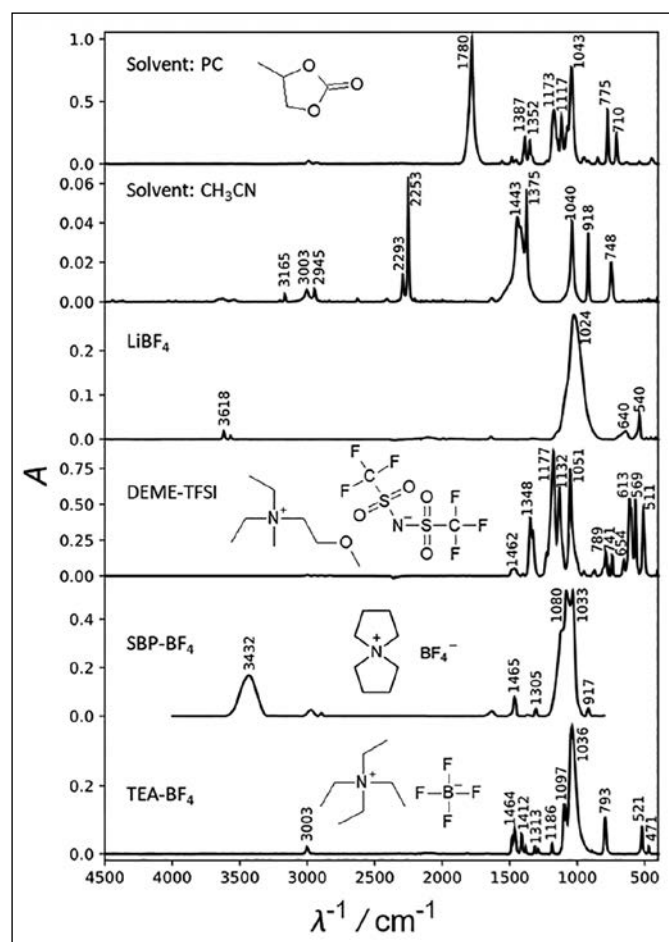
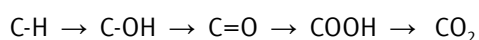


Figure 6: Infrared spectra of conducting salts

4 Chemical Aging Mechanisms

In the past, functional groups with oxygen on the activated carbon surface were considered beneficial for capacitance. More recently, harmful effects on aging and self-discharge have attributed to the partially oxidized carbon surface.



The infrared spectra of aged carbon anodes reveal enlarged bands for C-OH (at 3200, 1436 and 1350 cm^{-1}) and amide (at 3400, 1660 and 1540 cm^{-1}). Aged cathodes exhibit broad C-H signals at 900 cm^{-1} . Reference spectra of common electrolytes are compiled in Figure 6. The

RAMAN spectrum shows disordered and ordered carbon at about 1600 cm^{-1} and 1560 cm^{-1} . Aging acts mainly on the decreasing C-C stretch of ideal graphite (G: 1596 cm^{-1}) and growth of amorphous carbon (D_2 : around 1500 cm^{-1}). XPS spectra and GC/MS studies confirm that the cathodes age slower by reductive formation of C-H bonds than the anodes by formation of C-N and C-F bonds and loss of micropores. Surprising nitrogen compounds are produced mainly in the aged anodes in acetonitrile, e.g., pyridines, amines, and polyacetonitrile, even if quaternary ammonium is absent.

Our thermogravimetric analyses show that ammonium salts decompose to form ethene, triethylamine, fluorinated hydrocarbons, boron trifluoride and traces of hydrogen fluoride. It is known that tetrafluoroboric acid activates the cationic polymerization of alkenes, which may explain polymeric products in the electrode pores that originate from acetonitrile and hydrocarbon fragments. Defective supercapacitors based on acetonitrile-based electrolytes give off a popcorn-like odor in the event of an overvoltage. The white and brown residues inside and outside the capacitor can be reproduced by electrolysis of the electrolyte solution.

Water is harmful in supercapacitors. Acetonitrile forms acetamide and organic acids. Tetrafluoroborate is hydrolyzed to yield meta boric acid anions.

5 Conclusion

In the last two decades, supercapacitors based on activated carbon electrodes in organic electrolytes have captured a growing market for short-term storage devices. Lifetimes in the field of over ten years are known. What about the future of supercapacitors? Patents propose a world of solvents, conducting salts, and electrolyte additives, which promise better long-term stability and higher decomposition voltages. In the near future, deep insights into the chemical aging mechanisms might enable nominal voltages of up to 5 V.

References:

- [1] P. Kurzweil, J. Schottenbauer, C. Schell, Past, Present and Future of Electrochemical Capacitors: Pseudocapacitance, Aging Mechanisms and Service Life Estimation, *Journal of Energy Storage* 35 (2021) 2100079. DOI: 10.1002/adsu.202100079
- [2] P. Kurzweil, Supercapacitors, Vol. 1, pp. 587–694, in: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, J. Garche, Ch. Dyer, P. Moseley, Z. Ogumi, D Rand, B. Scrosati (Eds.), Amsterdam: Elsevier 2009.
- [3] P. Kurzweil, Electrochemical double-layer capacitors. In: Moseley, P.T., Garche, J. (Eds.) *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*, Chap. 19, pp. 345–407, Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [4] B. Frenzel, P. Kurzweil, H. Rönnebeck, Electromobility concept for racing cars based on lithium-ion batteries and supercapacitors. *J. Power Sources* 196, 5364–5376 (2011).
- [5] P. Kurzweil, H.J. Fischle, A new monitoring method for electrochemical aggregates by impedance spectroscopy. *J. Power Sources* 127, 331–340 (2004).
- [6] P. Kurzweil, B. Frenzel, A. Hildebrand, Voltage-dependent capacitance, aging effects, and failure indicators of double-layer capacitors during lifetime testing. *ChemElectroChem* 2(1), 6–13 (2015).
- [7] P. Kurzweil, A. Hildebrand, M. Weiß, Accelerated life testing of double-layer capacitors: Reliability and safety under excess voltage and temperature, *ChemElectroChem* 2(1), 150–159 (2015).
- [8] P. Kurzweil, M. Chwistek, Electrochemical stability of organic electrolytes in double-layer capacitors: spectroscopy and gas analysis of decomposition products. *J. Power Sources* 176, 555–567 (2008).
- [9] S. Trasatti, P. Kurzweil, Electrochemical Supercapacitors as versatile energy stores, Potential use for platinum metals, *Platinum Metals. Rev.* 38 (1994) 46-56.
- [10] P. Kurzweil, J. Ober, D. W. Wabner, Method for Correction and Analysis of Impedance Spectra, *Electrochim. Acta* 34 (1989) 1179-1185.

Kontakt:



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



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de

Instrumentelle Analytik: Verdrängungseffekte in Aktivkohleschüttungen bei der Abluftreinigung

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

Zusammenfassung

Absorptionsmedien auf Basis von Aktivkohle und Zeolithen wurden instrumentell-analytisch auf ihre Eignung für die Abluftreinigung bei der Klärschlamm-trocknung untersucht. Eine Herausforderung besteht in der angemessen hohen Temperatur, um flüchtige organische Verbindungen möglichst vollständig zu adsorbieren, das Auskondensieren von Wasser jedoch zu vermeiden. Modellexperimente, thermogravimetrische und gaschromatografische Analysen erweisen, dass flüchtige Schwefelverbindungen oberhalb 70 °C am ehesten mit Aktivkohle aus Kokosnussschalen gefiltert werden.

Abstract

The suitability of absorption media based on activated carbon and zeolites for exhaust air purification during sewage sludge drying was investigated by instrumental analysis. One challenge is to achieve an appropriately high temperature to adsorb volatile organic compounds as completely as possible while avoiding the condensation of water. Model tests, thermogravimetric and gas chromatographic analyses show that volatile sulfur compounds above 70°C are best filtered out with coconut shell-based activated carbon.

Einleitung

Die novellierte Düngemittel- und Klärschlammverordnung [1] schränkt die Ausbringung von Klärschlamm als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen stark ein. Mehr als die Hälfte der kommunalen Klärschlämme wird in Verbrennungsanlagen thermisch entsorgt. Mittelfristig sollen Ressourcen, vor allem Phosphor, aus Trockenmassen oder Aschen der Klärschlammverbrennung zurückgewonnen werden. Verbrennung und Rückgewinnung setzen getrockneten Klärschlamm voraus.

Organische Belastungen, Arzneimittelrückstände, Schwermetalle, Nanomaterialien und Kunststoffreste im Klärschlamm erfordern eine einfach realisierbare und kostengünstige Abluftreinigung. Aktivkohleschüttungen bieten sich an, fordern aber eine richtige Ablufttemperatur, damit Feuchtigkeit nicht kondensiert, aber flüchtige organische Verbindungen (VOC) quantitativ adsorbieren. Kohlenwasserstoffe konkurrieren mit übelriechenden Schwefelverbindungen um Bindungsplätze. In welchem Ausmaß beispielsweise Dimethylsulfid durch Toluol

verdrängt wird, haben wir an verschiedenen Sorbentien untersucht.

- A: alkalisch imprägnierte Aktivkohle auf der Basis von Steinkohle
- B: wasserdampf-aktivierte Aktivkohle auf Steinkohlebasis
- C: Aktivkohle auf Basis von Steinkohle
- D: Aktivkohle auf Basis von Kokosnussschalen
- M: Molekularsieb

Abluftreinigung im Labormaßstab

Die Abluftaufbereitung einer Klärschlamm-trocknungsanlage wurde im Labormaßstab nachgestellt. Ein konstant fließender Druckluftstrom wurde mit einem definiert zusammengesetzten Schadstoff-Wasser-Gemisch beaufschlagt und durch eine Adsorptionskolonne geleitet (Abbildung 1). Der mittels einer Kupferspirale im beheizten Ölbad aufgeheizte Luftstrom floss durch ein Verdampfungsgefäß, in das eine Dosierpumpe laufend ein Gemisch aus Wasser, Toluol und Dimethylsulfid zuführte.

Vom Verdampfungsgefäß strömt die befeuchtete, mit Schadstoffen beladene Luft durch die Aktivkohleschüttung. Am Ausgang der Kolonne überwachen Sensoren die Versuchsparameter über einen Zeitraum von vier Tagen (Abbildung 2). Hinter dem Adsorber wurden laufend Gasproben für die analytische Untersuchung entnommen.



Abbildung 1: Versuchsaufbau aus (1) beheizter Kupferspirale zum Vorwärmen der Druckluft, (2) Verdampfungsgefäß mit Gemischzufuhr, (3) Dosierpumpe, (4) Adsorber-Kolonne, (5) Entnahmeeinrichtung für Abluftproben.

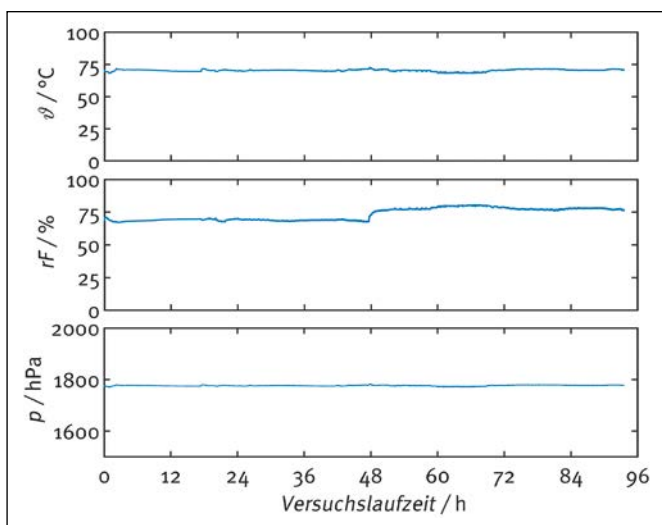


Abbildung 2: Gemessene Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck am Ausgang der Kolonne.

Gasanalytik

Mit GC/MS-Analytik wurde der Dimethylsulfid-Gehalt hinter der Abluftreinigung überwacht, um vermutete Verdrängungseffekte durch Toluol nachzuweisen. Über die Versuchslaufzeit wurden aus der Gasmasse laufend einige Mikroliter gefilterte Abluft genommen, chromatografisch getrennt und massenspektrometrisch identifiziert und quantifiziert. Abbildung 3 zeigt die zeitliche Entwicklung der Peakflächen für Dimethylsulfid als Maß für die tatsächliche Konzentration im Abluftstrom. Die absolute Konzentration in der gereinigten Abluft bewegt sich im Spurenbereich, was die Streuung der Messwerte erklärt.

Dennoch sind deutliche Tendenzen zu erkennen. Aktivkohle A lässt im Lauf der Versuchsdauer Dimethylsulfid durchbrechen, was auf Verdrängungseffekte durch Toluol hindeuten könnte. Sicher lässt sich sagen, dass keine der vier getesteten Aktivkohlen das Dimethylsulfid bei einer Ablufttemperatur von 75 °C vollständig herausfiltert. Hingegen konnte in keiner Abluftprobe Toluol nachgewiesen werden, das offensichtlich vollständig am Adsorber bindet.

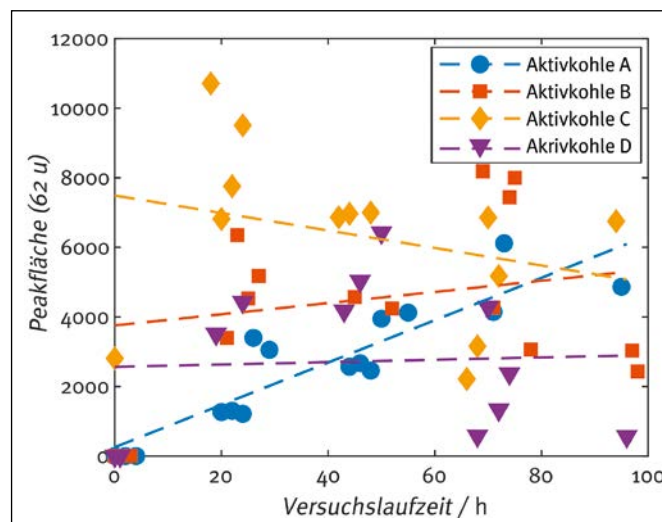


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der Dimethylsulfid-Konzentration (Peakfläche m/z 62) hinter dem Aktivkohle-Adsorber im viertägigen Langzeitexperiment.

Wasser- und Schwefelgehalt

Um sicherzustellen, dass die Adsorbentien im Laufe des Experiments nicht Feuchtigkeit anreichern, wurde der Wassergehalt durch Karl-Fischer-Titration verifiziert (Tabelle 1). Hierzu werden repräsentative Proben aus der Schüttung in trockenes Methanol eingewogen. Methanol eluiert Wasser, welches coulometrisch detektiert und auf die Einwaage zurückgerechnet wird. Erfreulicherweise nimmt der Wassergehalt nicht allgemein zu, sondern einige Aktivkohlen werden im warmen Abluftstrom getrocknet.

Der Schwefelgehalt der Adsorbentien, insbesondere das adsorbierte Dimethylsulfid, wurde mit optischer Emissionsspektroskopie (ICP-OES) untersucht. Hierzu wurde jeweils ein Gramm Aktivkohle bei 200 °C in einem Druckbehälter mit 15 mL Salpetersäure aufgeschlossen, der Aufschluss auf 100 mL mit Reinstwasser verdünnt und spektroskopisch quantifiziert. Die Differenz des Schwefelgehalts vor und nach dem Dauerversuch steht für die adsorbierte Menge an Schwefel. Dimethylsulfid ($\text{CH}_3)_2\text{S}$ enthält 52 % Schwefel. Die adsorbierte Masse bleibt unterhalb der theoretisch möglichen zurück. Das Molekularsieb erweist sich als ungeeignet für die Adsorption organischer Schwefelverbindungen und Kohlenwasserstoffe.

Die maximal mögliche Masse an adsorbierten Substanzen wurde thermogravimetrisch bestimmt (Abbildung 4).

Tabelle 1: Wasser-, Schwefel- und Dimethylsulfidgehalt der Adsorbentien

Adsorbens	Wassergehalt $w(\text{H}_2\text{O})$ in %		Schwefelgehalt $w(\text{S})$ in mg/g		Adsorbiert $w(\text{DMS})$	Maximale Beladung
	Vorher	Nachher	Vorher	Nachher	in mg/g	$w(\text{DMS})$ in %
Aktivkohle A	9,7	8,0	3,5	3,9	0,70	5,1
Aktivkohle B	1,2	0,52	4,2	4,6	0,79	4,4
Aktivkohle C	1,5	7,6	6,2	6,5	0,50	3,4
Aktivkohle D	2,1	7,3	0,26	0,97	1,4	7,5
Molekularsieb	1,0	–	–	–	–	1,9

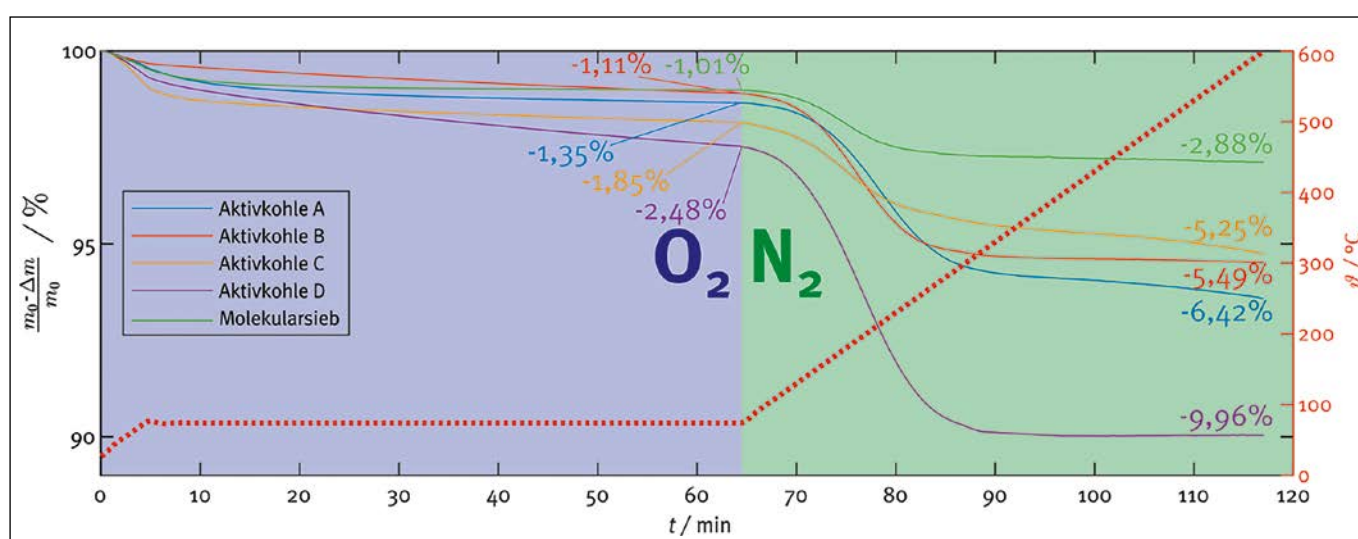


Abbildung 4: TGA-Kurven der beladenen Adsorbentien in Sauerstoff- und Stickstoffatmosphäre.

Die getrockneten Adsorbentien nehmen beim Einlegen in Dimethylsulfid unterschiedliche Mengen auf. Nach dem Trocknen bei 50 °C über 24 Stunden galten die Proben als maximal beladen. Im Sauerstoff bei 74 °C stellt sich nach einer Stunde eine nahezu konstante Gleichgewichtsbeladung ein. In Stickstoffatmosphäre wurde das Adsorbat bei bis zu 600 °C wieder ausgetrieben; die gemessene Massenabnahme gibt die maximale Beladung der Adsorbentien mit Dimethylsulfid bei 74 °C an. Aktivkohle D adsorbiert mit Abstand am meisten Dimethylsulfid.

Verdrängungseffekte

Die gegenseitige Beeinflussung der Adsorption von Toluol und Dimethylsulfid wurde mit der Gaschromatografie-Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS) untersucht. In 5-mL-Headspacegläschen mit exakt eingewogenem Adsorbentmaterial wurden mit einer Mikroliterspritze Dimethylsulfid und Toluol einzeln und in definierten Gemischen dosiert (Abbildung 5). Es wurde darauf geachtet, dass der Dampfraum nicht gesättigt ist und keine Flüssigkeit an der Glaswand kondensiert. Die Konzentrationen

wurden so klein gewählt, dass das Adsorbentmaterial im Überschuss vorhanden und nicht vollständig mit Dimethylsulfid oder Toluol belegt war.

Die gasdicht verschlossenen Gläschen wurden 24 Stunden bei 74 °C gelagert, so dass sich im Dampfraum ein Konzentrationsgleichgewicht einstellt. Mit einer gasdichten Spritze wurden wenige Mikroliter aus dem Dampfraum entnommen und mit GC/MS analysiert. Die Peakflächen der Chromatografiebanden bilden die aktuelle Gaskonzentration proportional ab (Abbildung 6). Das Verhältnis der Peakflächen von Toluol und Dimethylsulfid für die Reinsubstanzen und Mischproben dokumentiert einen möglichen Verdrängungseffekt. Ist das Konzentrationsverhältnis Toluol/DMS der Mischprobe kleiner als für die Reinsubstanzen, bedeutet dies, dass das Toluol bevorzugt adsorbiert wird und Dimethylsulfid aus der Aktivkohle verdrängt (Tabelle 2). Die Aktivkohlen A bis C eignen sich weniger gut für die restlose Adsorption von Dimethylsulfid in Gegenwart von Toluol, während Aktivkohle D und das Molekularsieb bevorzugt Dimethylsulfid adsorbieren.



Abbildung 5: Headspace-Gläschen mit Aktivkohle und Dimethylsulfid-Toluol-Gemischen.

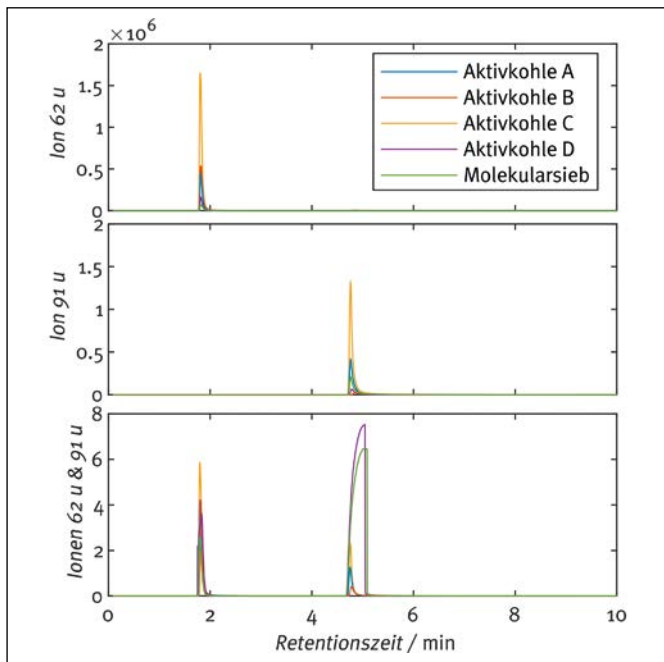


Abbildung 6: Single-Ion-Monitoring-GC/MS-Messungen im Dampfraum über verschiedenen Adsorbentien: Masse 62 für Dimethylsulfid, Masse 91 für Toluol.

Tabelle 2: SIM-GC/MS-Messungen für Dimethylsulfid (DMS) und Toluol

Adsorbens	Masse Adsorbens m / g	Zugebenes Volumen		Peakfläche normiert auf Adsorbermasse			
		DMS V / μL	Toluol V / μL	DMS (62 u)	Toluol (91 u)	Verhältnis Toluol/DMS	Gemisch/ Reinstoffe
Aktivkohle A	3,0087	150	0	3991939	–	–	1 : 2,8
	3,0050	0	300	–	4980537	1,25	
	2,9986	150	300	40721658	18117542	0,44	
Aktivkohle B	3,0123	250	0	6163320	–	–	1 : 1,5
	3,0190	0	500	–	1976701	0,32	
	3,0186	250	500	41105546	9225033	0,22	
Aktivkohle C	2,9948	150	0	15480928	–	–	1 : 1,7
	3,0014	0	300	–	14841827	0,96	
	3,0159	150	300	55161014	30072068	0,55	
Aktivkohle D	2,5026	300	0	2241181	–	–	7,3 : 1
	2,5081	0	600	–	1644195	0,73	
	2,5001	300	600	81588890	434925541	5,33	
Molekularsieb	3,0032	150	0	963487	–	–	2,6 : 1
	3,0056	0	150	–	4154774	4,31	
	3,0052	150	150	23896832	263598270	11,0	

Fazit

Aktivkohle D ist am besten geeignet, schwefelhaltige organische Verbindungen bei höheren Temperaturen zu absorbieren. Bei den geforderten Ablufttemperaturen der Klärschlamm-trocknung vermag jedoch keines der getesteten Adsorbentien Dimethylsulfid vollständig herauszufiltern. Es sollte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, die Ablufttemperatur zu reduzieren, wodurch das Absorptionsvermögen der Aktivkohle für sehr leicht flüchtige organische Verbindungen (VOC) merklich erhöht würde. Unerwünscht steigt dadurch der Feuchtegrad des Adsorbermaterials an.

Referenzen:

- [1] A. Roskosch, P. Heidecke, „Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland“, www.umweltbundesamt.de/publikationen, 03.08.2021
- [2] A. Heindl, F. Bischof, P. Kurzweil, Einfluss von Schwefel auf den Betrieb einer Kläranlage, Teil 2: Trocknung und thermische Verwertung von Klärschlamm, Korrespondenz Abwasser Abfall, 2019, 66(12), 1004-1011.

Projektpartner:

Regionale Firmen

Fördergeber:

Bayerisches Staatsministerium für
Wissenschaft und Kunst



Kontakt:



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Verein der Amberger Freunde der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden



Seit 1995 unterstützt der Verein die Entwicklung der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden durch ideelle und finanzielle Beiträge, die durch das Budget nicht abgedeckt sind. Für Prämien besonderer Leistungen der Studierenden, für Zuschüsse bei Forschungsprojekten, für die Realisierung des Technologiecampus.

Mit Ihrem Beitritt als Unternehmen oder Privatperson leisten Sie einen wichtigen Beitrag zur regionalen Stärkung des Standortfaktors Bildung und Ausbildung.

Besuchen Sie unsere Homepage über www.oth-aw.de/forschen-und-kooperieren/partner-netzwerke

Sie wollen Mitglied werden? Kontaktieren Sie uns.

Dipl.-Ing. (FH) Franz Mende, 1. Vorsitzender
Briefadresse: Siemens AG
Leiter Gerätewerk Amberg
Werner-von-Siemens-Straße 48
92224 Amberg

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

Automatisierungstechnik | Software | Informatik | Robotik
Schaltschränke | Elektrotechnik




WIR HABEN DAS FEELING FÜR AUTOMATION

www.fee.de/karriere

In Ihrer Brust schlummert ebenfalls ein Technik-Herz?
Dann bewerben Sie sich jetzt bei einem führenden Unternehmen im Bereich **Automatisierungstechnik!**

BESTE ZUKUNFTSPERSPEKTIVEN

F.EE bietet in den Bereichen **Elektrotechnik, Maschinenbau und Informatik** die Möglichkeit, in Form von **Praktika, Bachelor-/Masterarbeiten** oder auch einer **Festanstellung** Ideen Wirklichkeit werden zu lassen!

PROFITIEREN SIE VON DEN F.EE-BENEFITS

- Personalrabatte bei vielen Firmen und Onlineshops
- Moderne Kantine
- Betriebliche Altersvorsorge
- Gesundheitsmaßnahmen
- Flexible Arbeitszeiten*



FOLLOW US ON INSTAGRAM
@fee.group



F.EE-Unternehmensgruppe | In der Seugn 20 | 92431 Neunburg v. W.
☎ 09672 506-0 | ✉ bewerbung@fee.de | www.fee.de *Stellenbezogen.

Unsere aktuellen Öffnungszeiten: Immer - Überall.

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



Jeder Mensch hat etwas, das ihn antreibt.

Wir machen den Weg frei.

Sie wollen unabhängig und flexibel sein?
Dann sollte es auch Ihre Kontoverbindung sein!

Regeln Sie Ihre Bankangelegenheiten wie und wann immer Sie möchten. Ob im Internet, per Smartphone, in Ihrer Filiale vor Ort oder am Geldautomaten - so viel Freiheit muss sein!

Telefon: 09621 479-0
info@vr-amberg.de
www.vr-amberg.de




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

Chemometrische Wasseranalytik mit FTIR-Spektroskopie

Josef Schottenbauer, M.Eng.
Dipl.-Phys. Christian Schell
Christof Dinkelbach
Christian Gradl, B.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Zusammenfassung

Ionengehalt, Härte und organische Verunreinigungen in Wasserproben werden üblicherweise mit höchst unterschiedlichen Methoden analysiert. Für eine chemikalienfreie Schnellanalyse haben wir die Partial-Least-Squares-Regression (PLSR) bemüht, die in komplizierter Matrix jedoch an Grenzen stößt.

Abstract

Ionic composition, hardness and organic impurities in water samples are usually analyzed by very different methods. For a chemical-free rapid analysis, we used Partial Least Squares Regression (PLSR), which has its limitations with complicated matrices.

Wasserqualität ist Lebensqualität

Natürliches Wasser, die Grundvoraussetzung für Leben, enthält eine Vielzahl günstiger oder nachteiliger Stoffe: Salze und Minerale, Sauerstoff, Kohlendioxid, organische Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen, Mikroplastik. Carbonat – nützlich für die Anzucht von Pflanzen, Algen oder Mikroorganismen – geht im Trinkwasser mit Verkalkung der Leitungen einher. Die Carbonathärte korreliert mit dem Kalkgehalt, der beim Erhitzen als Kesselstein ausfällt. Die Gesamthärte gibt die Summe aller gelösten Erdalkalitionen in Millimol pro Liter an. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) misst die notwendige Sauerstoffmenge zur vollständigen Oxidation der organischen Wasserinhaltsstoffe. Der TOC-Wert gibt die Summe aller organischen Kohlenstoffverbindungen an. Die heutige Laboranalytik ermittelt die genannten Kennzahlen mittels Titration, Fotometrie oder spektroskopischer Verfahren – mit meist nicht unerheblichem Chemikalien- und Zeitaufwand. Im Folgenden wird eine schnelle, chemikalienfreie Methode mittels Infrarotspektroskopie zur semiquantitativen Erfassung der Trinkwassergüte vorgestellt [1, 2, 3].

Schnellanalytik mit FTIR

Komplexionen wie Ammonium, Carbonat, Phosphat, Sulfat und Borat zeigen charakteristische Banden im Infrarot-

spektrum [4-7], die das Absorptionsspektrum des Wasser überlagern und vielfältig beeinflussen. Die multilineare Regression – hier das Partial-Least-Squares-Verfahren (PLSR) – erfordert ein Modell auf guter Datengrundlage. Für die quantitative FTIR-Analyse werden Kalibrierlösungen bekannter Zusammensetzung gemessen. Daraus resultiert die n -mal- m -Matrix \mathbf{Y} , wobei m die Anzahl der bekannten Variablen (z. B. Ionenkonzentrationen) und n die Anzahl der Proben ist. Die gemessenen Spektren bilden die Matrix \mathbf{X} , mit n Zeilen und k Spalten (Absorbanz gegen Wellenzahlen). Beide Matrizen liegen dabei in autoskalierter Form, d. h. zentriert um den Mittelwert und normiert mit der Standardabweichung, vor.

Die Matrizen lassen sich, ähnlich wie bei der Hauptkomponentenanalyse [5], in Komponenten-, Ladungs- und Residuenmatrix zerlegen (Abbildung 1). Die „Komponenten“ sind die Koordinaten im neuen System der Hauptkomponenten. Jede Hauptkomponente erklärt einen Teil der Varianz der Daten. „Ladungen“ sind anschaulich die Umrechnungsfaktoren vom Ausgangssystem in das der Hauptkomponenten. Die Residuenmatrix beschreibt die nicht erklärte Varianz der Daten. Die Zerlegung erfolgt durch den so genannten NIPALS-Algorithmus.

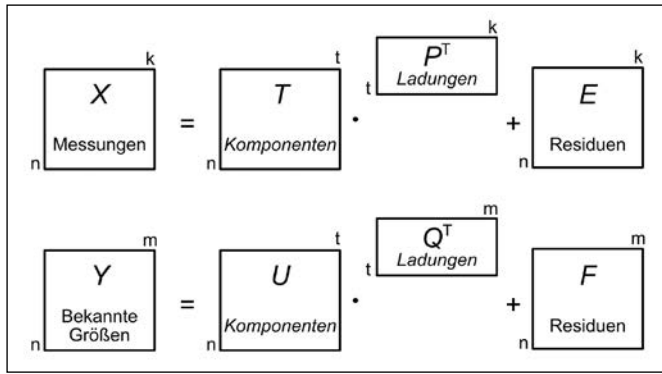


Abbildung 1: Zerlegung der Messdaten X und bekannten Konzentrationen Y in Komponenten.

Die PLSR ist, stark vereinfacht, eine doppelte Hauptkomponentenanalyse, bei der die Zerlegung der Matrizen unter Einbeziehung der jeweils anderen stattfindet. Die Matrizen X und Y stehen in äußerer Beziehung (Abbildung 1), wobei für die Matrix T gewichtete Größen von Nöten sind. Eine innere Beziehung beschreibt die Proportionalität b_h des h -ten Spaltenvektors der Matrix T zu dem der Matrix U (Gleichung 1).

$$u_h = b_h t_h \quad (1)$$

Zur iterativen Berechnung des Modells (Gleichung 2) werden die Ladungen der Matrizen untereinander ausgetauscht. Der Betrag der Residuenmatrix F soll dabei möglichst klein sein, um die beste Korrelation zu ermöglichen [9].

$$Y = BTQ^T + F \quad (2)$$

Werden die bekannten Konzentrationen der Kalibrierlösungen Y mit den aus den Spektren berechneten verglichen, gibt das Bestimmtheitsmaß R^2 die Güte des Modells an.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{\text{calc},i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

Weil nicht alle Hauptkomponenten und Absorbanzen zur Vorhersage beitragen und zudem Hintergrundrauschen beinhalten, kann die Vorhersagegenauigkeit durch Weglassen wenig relevanter Komponenten und Wellenzahlen verbessert werden. Bei der Kreuzvalidierung wird Messwert für Messwert aus der Kalibrierung herausgenommen und das Modell für den verringerten Datensatz berechnet. Aus den Vorhersagewerten der verwendeten Werte und der nicht verwendeten Testdaten ergibt sich der PRESS-Wert, der möglichst klein sein sollte [8, 9, 10].

$$\text{PRESS} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{\text{Test},i} - y_{\text{calc,Test},i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{\text{Test},i} - \bar{y}_{\text{Test}})^2} \quad (4)$$

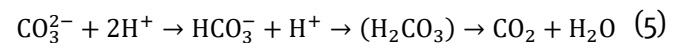
Carbonathärte und Chlorid

Für die PLSR-Modell-Kalibration wurden wässrige Lösungen mit bekannten Konzentrationen angesetzt: NaHCO_3 , Na_2CO_3 , K_2SO_4 , K_2HPO_4 , NaCl , NaNO_3 , NaOH , Natriumacetat, Glucose, Saccharose und Pepton, ein niedermolekulares Aminosäure-Peptid-Gemisch. Die organischen Stoffe sorgen für einen Hintergrund im gemessenen Spektrum, damit es Realproben ähnlicher wird. Für das Modell wurden im Wellenzahlbereich von 1800 bis 800 cm^{-1} die zweiten Ableitungen der Absorptionsspektren $A(\lambda^{-1})$ herangezogen, auf die der Untergrund des Wassers wenig Einfluss hat.

Der Datensatz umfasst etwa 350 Spektren. Bei der Kalibration für Hydrogencarbonat und Carbonat in Abbildung 2 fällt auf, dass die numerische Auswahl der Messwerte zur Berechnung der Komponenten in den Bereich der charakteristischen Absorptionspeaks um 1400 cm^{-1} fällt – allerdings leicht verschoben, da die zweite Ableitung verwendet wurde [4]. Die Kreuzvalidierte Vorhersage bei 42 verwendeten Hauptkomponenten ist mit 99.59 % Güte für HCO_3^- und 99.25 % für CO_3^{2-} sehr gut.

Chlorid als einatomiges Ion ist nicht infrarot aktiv, die Quantifizierung ist jedoch indirekt über die Deformation der Wasser-OH-Bande bei 3800 bis 2800 cm^{-1} möglich (Abbildung 3). Die Bande kommt durch die Überlagerung von fünf Dipolschwingungen zustande, die unterschiedlich ausgerichtete Wasserstoffbrückenbindungen mit solvatisierten Ionen abbilden [6, 7].

Die Carbonathärte wird klassisch durch den Verbrauch von 0,1-molarer Salzsäure bis zum pH-Wert 4.2 bestimmt. Tabelle 1 vergleicht Titrationswerte und FTIR-Messungen [2]. Zur Validierung des Verfahrens wurden sieben Wasserproben untersucht. Auffällig ist die größere Abweichung bei kohlenstoffhaltigen Wässern. Die FTIR-Methode erfasst auch physikalisch gelöstes CO_2 .



Das Hydrogencarbonat-Carbonat-Gleichgewicht (Gleichung 5) ermöglicht außerdem die infrarotspektrometrische pH-Messung. Sind die Konzentrationen von HCO_3^- und CO_3^{2-} bekannt, kann mit Gleichung 6 der pH-Wert berechnet werden. Bei acht Messungen in einem Ionenkonzentrat betrug der mittlere relative Fehler 1.3 %.

$$\text{pH} = -\lg \left(10^{-\text{p}K_{a2}} \cdot \frac{c_{\text{HCO}_3^-}}{c_{\text{CO}_3^{2-}}} \right) \quad (6)$$

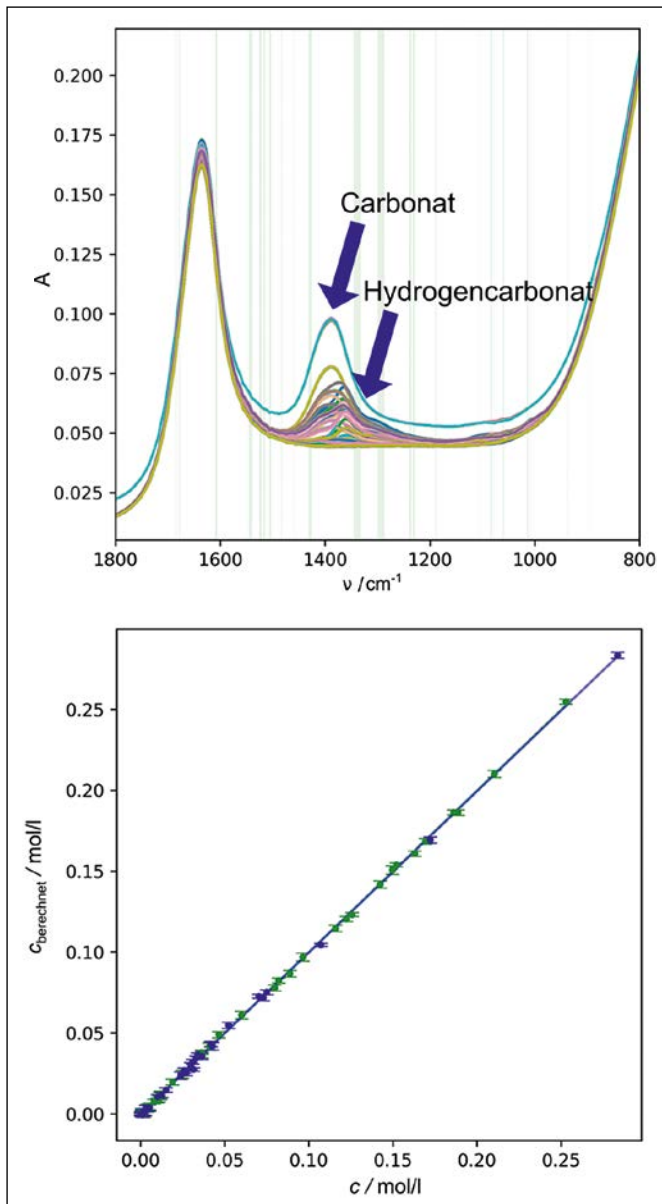


Abbildung 2: PLSR-Kalibration für Carbonat und Hydrogencarbonat (je zwei überlagerte Banden um 1400 cm^{-1}). Oben: FTIR-Spektren und verwendete Messwerte (grüner Hintergrund). Unten: Vom Modell vorhergesagte Konzentrationen gegen die tatsächlichen Messwerte mit Fehlerbalken für Hydrogencarbonat (grün) und Carbonat (blau).

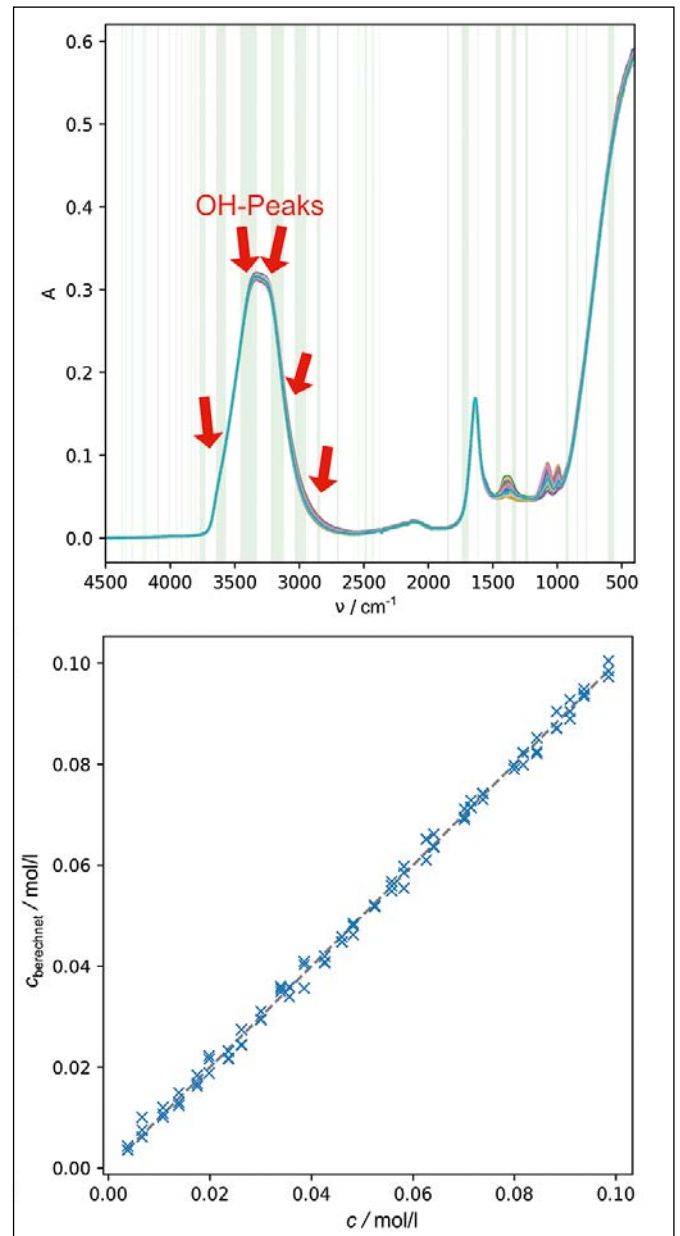


Abbildung 3: PLSR-Kalibration für Chlorid (analog Abbildung 2). Kreuzvalidierte Güte $R^2 = 97,2 \%$ für 18 Hauptkomponenten.

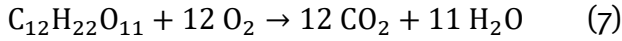
Tabelle 1: Carbonathärte $c(\text{HCO}_3^-)$ in mmol/L verschiedener Trink- und Mineralwasserproben.

Probe	Titration	FTIR	Relative Abweichung
<i>Stille Wässer</i>	mmol/L	mmol/L	
Hirschquelle	23,5	23,6	+ 0,4 %
Adelholzener Sanft	5,5	5,7	+ 4 %
Fachingen Still	33	34	+ 3 %
Amberger Leitungswasser	1,7	1,5	- 13 %

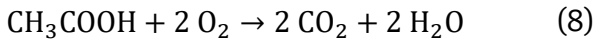
Probe	Titration	FTIR	Relative Abweichung
<i>Kohlensäurehaltig</i>	mmol/L	mmol/L	
Frankenbrunnen Sanft	8,1	9,1	+ 12 %
<i>Labertaler Classic</i>	6,4	16	+150 %
<i>Förstina Sprudel</i>	16	22	+ 38 %

Organische Belastung

Organische Verbindungen besitzen eine Vielzahl charakteristischer Peaks im Infrarotspektrum. Für die Kalibration wurden wässrige Acetat- und Saccharose-Lösungen angefertigt und für alle Konzentrationen theoretische organische Kohlenstoffgehalte (TOC) und chemische Sauerstoffbedarfe (CSB) aus den Summenformeln und Oxidationsgleichungen abgeleitet.



$$c(\text{Saccharose}) = 12 \text{ CSB} = 12 \text{ TOC}$$



$$c(\text{Acetat}) = 2 \text{ CSB} = 2 \text{ TOC}$$

Abbildung 4 zeigt das PLSR-Kalibrationsmodell für den CSB-Wert. Die Kreuzvalidierung wählt richtig Wellenzahlen im Bereich der charakteristischen Schwingungsbanden des Kohlenwasserstoffgerüsts (Tabelle 2). Für 0,178 g/L = 0,52 mmol/L Saccharose ergibt die klassische CSB-Bestimmung $\beta(\text{O}_2) = 0,197 \text{ g/L}$ (Theorie: 0,199 g/L) und die FTIR-Methode 0,2 g/L.

Die Kalibration auf den TOC-Wert verläuft völlig analog mit einer kreuzvalidierten Modellgüte von 97,82 %. Die Kalibration gilt streng nur für Lösungen mit Acetat und Saccharose.

Ein allgemeines Modell für den TOC und CSB beliebig zusammengesetzter Proben ist uns bislang nicht gelungen. Die Partial-Least-Squares-Regression erweist sich als sehr leistungsfähiges Werkzeug der analytischen Chemie zur Quantifizierung gelöster Ionen und Moleküle. Allerdings ist das Berechnungsmodell immer nur so gut, wie die Daten die zur Erstellung beitrugen. Bei realen Proben stört das Hintergrundspektrum der Matrix.

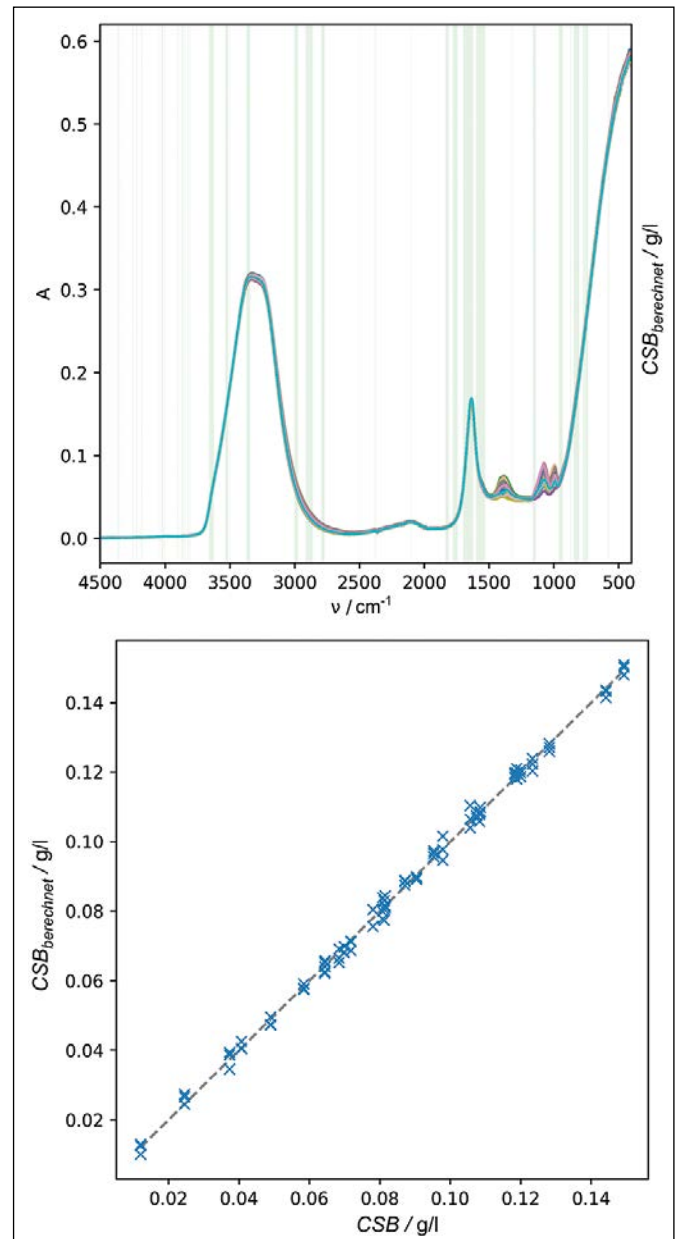


Abbildung 4: PLSR-Kalibration für den CSB-Wert. Gemessene FTIR-Spektren der Maßlösungen und für das Modell verwendete Messwerte (grüner Hintergrund). Unten: Durch das Modell vorhergesagte Konzentrationen gegen die tatsächlichen Messwerte. Kreuzvalidierte Güte $R^2 = 98.12 \%$ für 16 Hauptkomponenten.

Tabelle 2: Typische Infrarot-Schwingungsbanden für Valenz- (ν) und Deformationsschwingungen (δ) der Kohlenwasserstoffe [2].

Wellenzahl (Bandenmaximum)	Schwingung
3645 und 3521	ν (OH ... H)
3357	ν (C–H)
2992	ν (C–H), ν (C=C), Aromat
2995 und 2782	ν (C=C)
2103	ν (C≡C)

Wellenzahl (Bandenmaximum)	Schwingung
1825	Carbonsäuren
1760	ν (C=O)
1667 und 1566	ν (C=C), Aromat
1150	ν (C–O)
950 und 746	ν (C–H)

Referenzen:

- [1] P. Kurzweil, Chemie, 10. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015.
- [2] H. Hug, P. Kurzweil. Tabellenbuch der analytischen Chemie, Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2017.
- [3] Wasser. Umweltbundesamt, 2021. www.umweltbundesamt.de/themen/wasser
- [4] J. Schottenbauer, N. Zell, C. Schell, P. Kurzweil. Intelligente Infrarotspektroskopie: Monitoring von Molekül-Ionen und Naturstoffen, OTH-Forschungsbericht (2021) 205 – 208.
- [5] N. Zell, I. Jakobi, E. Bisse, J. Schottenbauer, C. Schell, P. Kurzweil. Hauptkomponentenanalyse, eine analytische Bierprobe, OTH-Forschungsbericht (2021) 133 – 137.
- [6] P. Laurson, P. Raudsepp, H. Kaldmäe, A. Kikas, U. Mäeorg. The deconvolution of FTIR-ATR spectra to five Gaussian for detection of small changes in plant-water clusters. AIP Advances 10 (2020) 085214.
- [7] C. Choe, J. Lademann, M. E. Darwin. Depth profiles of hydrogen bound water molecule types and their relation to lipid and protein interaction in the human stratum corneum in vivo, Analyst 141 (2016) 6329.
- [8] N. Zell. Entwicklung und Erprobung chemometrischer Analyse- und zugehöriger Referenzverfahren, Masterarbeit, OTH Amberg-Weiden, 2020.
- [9] P. Geladi, B. R. Kowalski. Partial least-squares regression: A tutorial. Analytica Chimica Acta, 185 (1986) 1-17.
- [10] Pedregosa et al., Scikit-learn: Machine Learning in Python. JMLR 12 (2011) 2825 – 2830.

Kontakt:



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Dipl.-Phys. Christian Schell

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

ch.schell@oth-aw.de



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



Christian Gradl, B. Eng.

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

c.gradl1@oth-aw.de



Christof Dinkelbach

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

Computerchemie: Intelligente Absorption- spektroskopie mit numerischen Methoden

Josef Schottenbauer, M.Eng.
Niklas Zell, M.Eng.
Prof. Dr. Peter Kurzweil

Zusammenfassung

Infrarot- und Ultraviolett-Spektroskopie sind leistungsfähige Methoden für die Umwelt-, Lebensmittel- und Schadensfallanalytik. Die computergestützte Interpretation und chemometrische Spektrenauswertung mit Python-Programmen helfen, den oftmals erheblichen Arbeitsaufwand für die Spektrenanalyse bei Nichtroutine-Fragestellungen zu beherrschen.

Abstract

Infrared and ultraviolet spectroscopy are powerful methods for environmental, food, and damage analysis. Computer-aided interpretation and chemometric spectra evaluation with Python programs help to control the considerable amount of work involved in spectra analysis for non-routine questions.

Vom Spektrum zur Gefahrenabwehr

Die Vision des elektronischen Chemielabors (Lab-on-a-Chip) erschließt moderne Analytik für Verkehr, Lebensmittelüberwachung und Sicherheitsvorrichtungen. Berührungslose Spektroskopie im selbstfahrenden Auto soll Fußgänger von der Umgebung unterscheiden und die Fahrtüchtigkeit der Insassen erkennen. Doch ehe die Expertise menschlicher Fachleute in die Hand unerfahrener Anwender wechseln kann, müssen fundamentale Zusammenhänge der Spektreninterpretation in einem automatisiertes Expertensystem etabliert werden.

Dieser Artikel zeigt die numerischen Möglichkeiten der Spektrensubtraktion, Basislinienkorrektur, Glättung, Peaksuche und Bandenerkennung anhand praktischer Beispiele auf.

Reale Proben sind selten Reinstoffe, sondern komplizierte Gemische oder Lösungen aus vielen Stoffen. Das FTIR-Spektrum einer Ethanol-Wasser-Mischung kann herkömmliche Spektrendatenbanken bereits überfordern. Der menschliche Analytiker unterscheidet im überlagerten Spektrum den Hintergrund des Lösemittels L von den Absorptionsbanden des Analyten X (Abbildung 1).

$$A = A(X) + w \cdot A(L)$$

Der Spektranteil w des Lösemittels ($w = 0$ bis 1) wird durch eine Art Basislinienkorrektur mithilfe der ersten Ableitung bestimmt [1]. Beim Dewiggle-Subtraktionsverfahren [2] wird das Residuenspektrum numerisch differenziert und als aufintegrierter Betrag der Ableitung ein Komplexitätsmaß bestimmt, das beim optimalen Subtraktionsfaktor w ein Minimum erreicht (Abbildung 2).

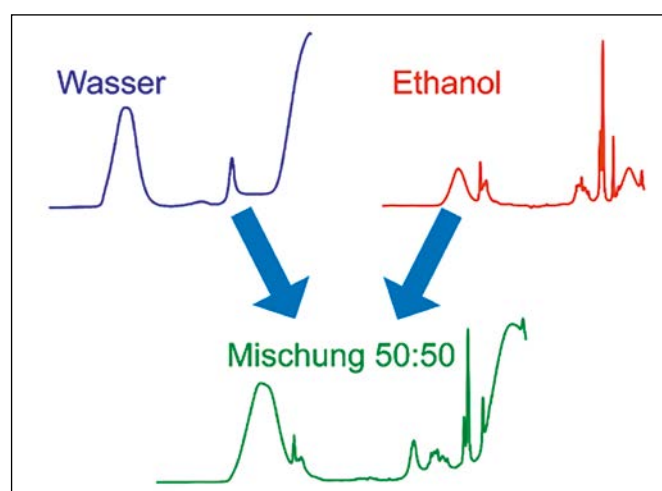


Abbildung 1: FTIR-Spektren von Wasser, Ethanol und einem Gemisch

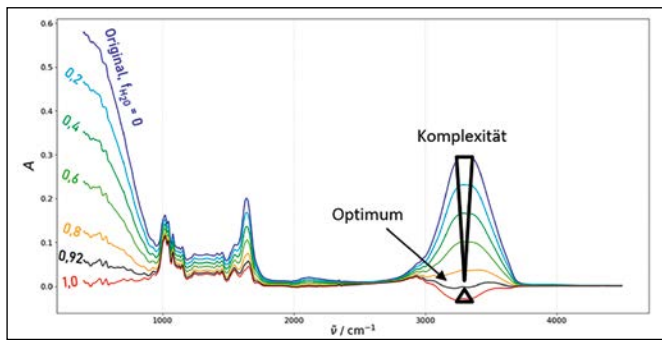


Abbildung 2: Korrektur des Wasseranteils aus dem FTIR-Spektrum eines Sauersteigs nach dem Dewiggle-Kriterium: Am Optimum ist $w = 0,92$: Korrigiertes Spektrum = Originalspektrum $- 0,92 \cdot$ Wasser-spektrum

Glätten

Die Banden in UV/Vis- und IR-Spektren und in der Chromatografie müssen vor der automatischen Auswertung oftmals geglättet werden. Die Whittaker-Glättung (Discrete penalized least squares fit) [3] findet eine geglättete Version \mathbf{z} des vorgegebenen Messwertvektors \mathbf{y} durch Minimierung des Terms Q .

$$Q = P + \lambda R = \sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2 + \lambda \sum_{i=2}^{N-1} (z_{i-1} - 2z_i + z_{i+1})^2$$

$$= |\mathbf{y} - \mathbf{x}|^2 + \lambda |\mathbf{D} \mathbf{z}|^2$$

P ist die Summe der quadratischen Abweichungen der Messpunkte von der geglätteten Kurve, R ein Rauigkeitsmaß für die „Welligkeit“ der zweiten Ableitung, λ die Strafgewichtung der Rauigkeit nach Whittaker und \mathbf{D} die Matrix mit den Einträgen 0, +1 oder -1 zur numerischen Berechnung der zweiten Ableitung durch finite Differenzen. Sobald λ durch Minimierung des internen Vorhersagefehlers mittels Kreuzvalidierung objektiv bestimmt wurde, ergibt sich nach der optionalen Einführung eines Gewichtungsvektors \mathbf{w} für Interpolation und fehlende Daten die geglättete Kurve \mathbf{z} in Abbildung 3:

$$(\mathbf{W} + \lambda \mathbf{D}^T \mathbf{D}) \cdot \mathbf{z} = \mathbf{W} \mathbf{y}$$

\mathbf{W} ist eine Diagonalmatrix mit dem Gewichtungsvektor \mathbf{w} auf der Hauptdiagonalen.

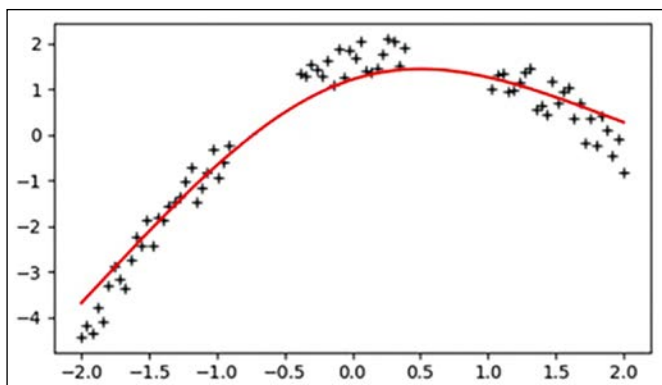


Abbildung 3: Whittaker-Glättung von Messpunkten (+) auf eine analytisch nicht vorgegebene Funktion

Basislinienkorrektur

Nach dem Prinzip der asymmetrischen Kurvenanpassung (Asymmetric Least Squares fit) [4] wird die Funktion Q minimiert, um aus dem Signalvektor \mathbf{y} diejenigen Messpunkte y_i zu ermitteln, die tatsächlich die Basislinie ausmachen, um damit den Basislinienvektor \mathbf{f} möglichst objektiv zu schätzen (Abbildung 4).

$$Q = \sum_i w_i (y_i - f_i)^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 f_i)^2 \rightarrow \min$$

Im Prinzip handelt es sich hierbei um eine andere Formulierung der Whittaker-Glättung, nur dass der Gewichtungsvektor \mathbf{w} geschickt modifiziert wird. Ein Messpunkt y_i , der zur Basislinie gezählt wird (Grundlinienpunkt), erhält eine Gewichtung von 0.99 bis 0.999. Hingegen erhalten Punkte oberhalb der Basislinie eine Gewichtung von 0.001 bis 0.01, damit ihr Einfluss auf Q aufgehoben wird. Durch iterative Anpassung der Messpunktfraction, die zur Basislinie gerechnet werden kann, und entsprechende Neujustierung des Gewichtsvektors wird die Schätzung der Basislinie sukzessiv verbessert. Das Rauigkeitsstrafmaß λ ist maßgeblich für die Glättung der Basislinienschätzung verantwortlich und ist mangels objektiver Bestimmungsmethoden manuell vorzugeben. Als Maß für die Rauigkeit gilt, wie auch bei der Whittaker-Glättung, die „Welligkeit“ der zweiten Ableitung (Δ^2), die ebenfalls über die finite-Differenzen-Matrix \mathbf{D} berechnet werden kann.

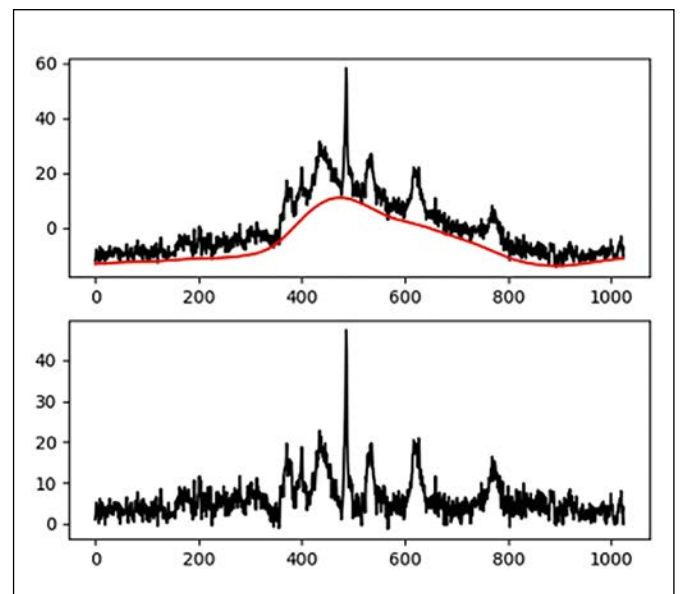


Abbildung 4: Ein Infrarotspektrum $A(\lambda^{-1})$ vor und nach Basislinienkorrektur.

Peaksuche

In der Absorptionsspektroskopie und Chromatografie ist die Lage der Bandenmaxima bei bestimmten Wellenlängen, Wellenzahlen oder Retentionszeiten von besonderer Bedeutung. Bei der kontinuierlichen Wavelet-Transformation (CWT) [5, 6, 7], eine Art der mehrfachauflösenden Signalzerlegung, wird die Bandenform, insbesondere die

Breite in die Peaksuche einbezogen. Die ursprüngliche Messkurve $f(x)$ wird mit einer Wavelet-Funktion der Breite a an einer bestimmten Position b multipliziert und integriert (vgl. Faltung).

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \overline{\Psi_{a,b}} dx = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

Daraus ergibt sich an der jeweiligen Position b ein Wert für die Übereinstimmung, ein Pattern-Matching, der Wavelet-Funktion mit der aktuellen Breite a . Ein hoher Wert $W_f(a, b)$ heißt, dass sich sehr wahrscheinlich ein Peak mit der Breite a an Position b befindet. Bei niedriger Skalierungsbreite a findet sich ein Großteil des Rauschens der Funktion wieder; bei höherer Skalierungsbreite die breiteren Peaks des Messsignals, die ausgewertet werden müssen. Wavelets trennen „hochfrequentes“ Rauschen und „niederfrequente“ Peaks. Basislinien stören nicht. Die Messkurve muss vorher nicht geglättet werden.

Die Peaksuche gelingt mit dem Wavelet-Verfahren (hier: Lorentian of Gauss Wavelet, mit Vorfaktor: Ricker-Wavelet, Mexican Hat) [8], das die Position der Gratlinien (ridge lines) auf dem Wavelet-Gebirge und ihre Halbwertsbreite aufspürt (Abbildung 5).

$$\psi = \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right) \cdot e^{-\frac{(x/a)^2}{2}}$$

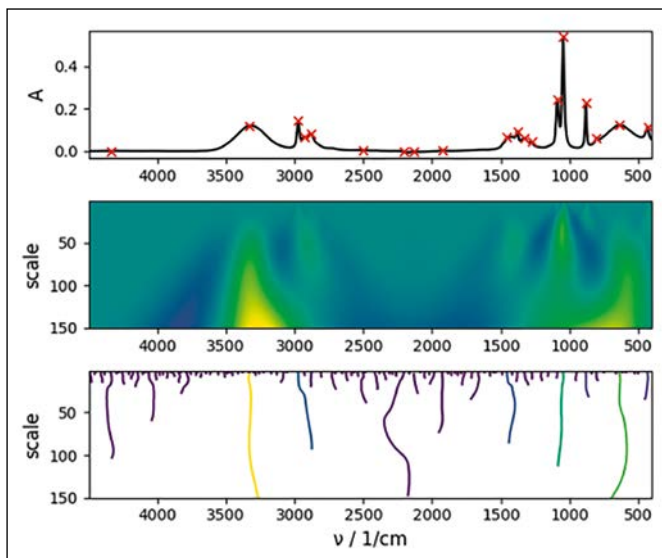


Abbildung 5: Peaksuche (x) im FTIR-Spektrum einer Ethanol-Wasser-Mischung (oben). Wavelet-Raum $W(a, b)$ nimmt von Blau über Grün nach Gelb zu (Mitte). Gratlinien der IR-Banden (unten). Hier: Wellenzahl = b

Um nun Peaks zu identifizieren, wird die CWT für verschiedene Skalierungsbreiten a durchgeführt, wobei der höchste Wert von a der geschätzten maximalen Peakbreite entsprechen sollte. Da b die Position eines Messpunktes darstellt, ist b bereits durch das Signal y vorgegeben. Damit ergibt sich ein 2D-Raster, auf dem die CWT durchgeführt wird. Bandenmaxima lassen sich aus dem resultierenden CWT-Gebirge (Abbildung 5 Mitte) heraus-

lesen, denn sie sind charakterisiert durch (1) die höchste Gratlinie, auf die skaliert wird, (2) das Signal-Rausch-Verhältnis, definiert als Peakmaximum im Verhältnis zum 95%-Quantil der Werte im Wavelet-Raum bei Skalierung = 1, (3) die Länge der Gratlinie. $W(a, b)$ nimmt von Blau über Grün nach Gelb zu.

Bandenanpassung

Optimierungsalgorithmen passen die realen Messdaten an theoretische Modellfunktionen an. Die Particle-Swarm-Optimierung [10, 11] – vom Nahrungssuchverhalten eines Schwarms von Organismen inspiriert – ist als globaler Optimierungsalgorithmus ideal für die Bandenanpassung geeignet. Jedes Individuum (mögliche Lösung für die Bandenanpassung) hat ein Gedächtnis, wo die beste Lösung des Problems lag und wie die Nachbarn sich verhielten (Entscheidungsvektor). Auf Basis dessen werden die gesuchten Positionen erneuert und verbessert, um neue mögliche Lösungen hin zu dem globalen Minimum der Zielfunktion zu generieren (Abbildung 6).

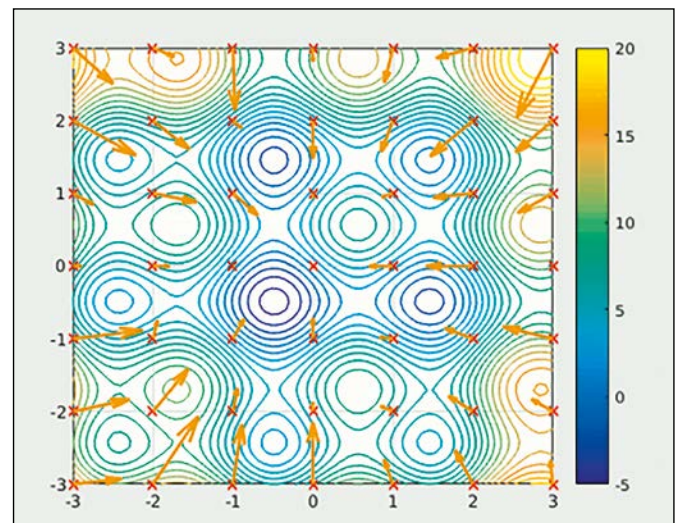


Abbildung 6: Ein Partikelschwarm sucht das globale Minimum einer Funktion (Wikipedia [9]). Von der gezeigten Ausgangssituation streben die roten Teilchen (x) ins Bildinnere zum Optimum.

Das von Zell entwickelte *Derivative-Penalized Peak-Fitting* (DPPF) berücksichtigt neben dem Grundspektrum auch die Ableitung des Absorptionsspektrums, was die Anpassung stark überlappender Peaks verbessert. Baldassare et al. [12] belegen Verletzungen der zweiten Ableitung mit einem subjektiven Straffaktor, $w \approx 30$. Im Fehlerquadratverfahren wird die Restsumme der quadrierten Residuen für die Anpassung der Messkurve Q und der zweiten Ableitung Q'' minimiert.

$$Q + w \cdot Q'' \rightarrow \min$$

Die subjektive Gewichtung lässt sich durch die Standardabweichung aus Mehrfachmessungen derselben Probe objektivieren. y sind die N Messwerte, z die an die Zielfunktion angepassten Werte.

$$Q = \sum_{i=1}^N w_i (y_i - z_i)^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - z_i}{\sigma_i} \right)^2$$

Zunächst fasst man das Absorptionsspektrum y als gewichtete Summe von m normierten „Einheitspeaks“ der Amplitude 1 auf (Matrix E). Werden diese Einheitspeaks vorgegeben, lassen sich ihre Peakamplituden h_i in Form des Amplitudenvektors h automatisch über gewichtete lineare Regression berechnen (Abbildung 7). Gleiches gilt für die Ableitungen und die Kombination von Originalspektrum und seinen Ableitungen (E^q bezeichnet die q -te Ableitung).

$$y(\lambda^{-1}) = \sum_{i=1}^m h_i E_i^q(\lambda^{-1})$$

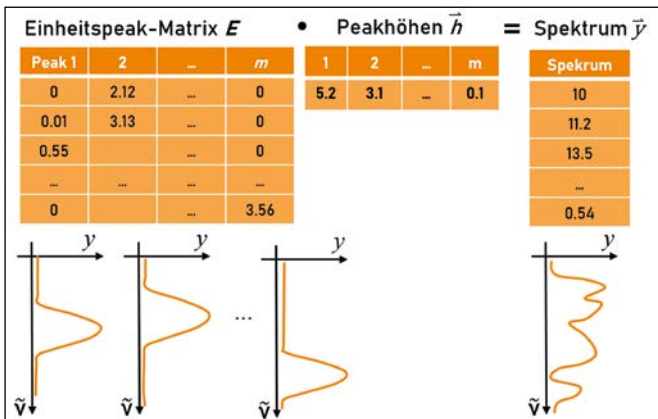


Abbildung 7: Prinzip der Kurvenanpassung mit gewichteten Einheitspeaks: y-Achse ist Absorbanz gegen Wellenzahl

Die Spektren und Ableitungen der Einheitspeaks werden hierzu spaltenweise in der Matrix E dargestellt und mit dem Kehrwert der quadrierten Standardabweichungen eines jeden Messpunkts in der Gewichtungsmatrix W gewichtet. Weil mögliche Kollinearitäten in E für die Inversion der Matrix schädlich sind, wird für $(E^T W E)^{-1}$ besser eine generalisierte Inversion, die Moore-Penrose-Pseudoinverse, angesetzt.

$$h = (E^T W E)^{-1} E^T W y$$

Im Umkehrschluss heißt das, dass bei vorgegebenen Einheitspeaks automatisch die Amplituden festgelegt sind, oder anders formuliert: Ein Optimierungsalgorithmus muss nur noch mögliche Einheitspeaks vorgeben und die restliche Bandenanpassung erfolgt dann völlig automatisch und zugleich bestmöglich objektiv. Durch gezielte Variation der Einheitspeaks mittels PSO wird das optimale Ergebnis für die Bandenanpassung erzielt. Die Konvergenz zum globalen Optimum wird durch die Berücksichtigung der Ableitungen durch den Ausschluss von Nebenoptima begünstigt.

Abbildung 8 zeigt ein synthetisches Spektrum aus fünf Voigt-Funktionen mit vorgegebenen Amplituden und Rauschen (ungleiche Rauschstärke führt zu ungleichen Gewichtungen). Die Kurvenanpassung mit der DPPF-Methode liefert die Peakhöhen bis auf rauschinduzierte Abweichungen exakt wieder. Jede Bande im Spektrum wird durch eine statistische Funktion der Fläche Eins mal einen von der Signalbreite unabhängigen Skalierungsfaktor (Amplitude) angenähert.

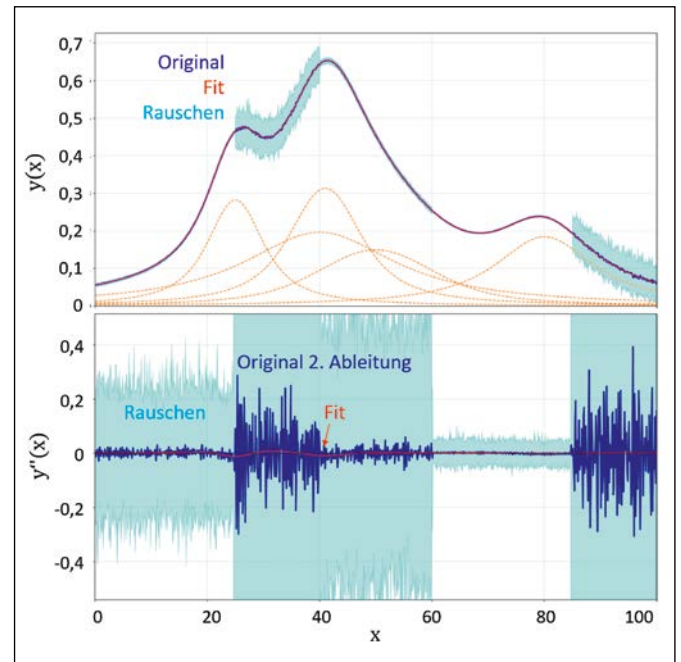


Abbildung 8: Bereichsweise unterschiedlich stark verrauschtes Absorptionsspektrum aus fünf zugrundeliegenden Voigt-Funktionen (hellgrün) der Peakamplitude 5, 10, 7, 6 und 5. Die rote Linie zeigt die Bandenanpassung mittels DPPF-Methode, die die unterschiedlichen Rauschlevel kompensiert. Hier: y = Absorbanz, x = Wellenzahl."

Praxisbeispiel

Wasser besitzt ein sehr charakteristisches FTIR-Spektrum (Abbildung 9). In der breiten OH-Bande oberhalb 3200 cm^{-1} überlagern sich mehrere von Wasserstoffbrücken vermittelte Vorgänge. Unterhalb 1600 cm^{-1} absorbiert Wasser infrarotes Licht breitbandig. Die computergestützte Wavelet-Peaksuche findet eine mögliche Struktur der OH-Banden, die das Originalspektrum verbirgt. Nach 1100 Optimierungsgenerationen wurden winzige Banden (Fläche kleiner Eins) entfernt und damit das verbliebene Spektrum erneut „gefittet“. Nach 2000 Particle-Swarm-Generierungen erklären zwölf Peaks mit 99,998%iger gewichteter Fitgüte das reale Spektrum nahezu perfekt.

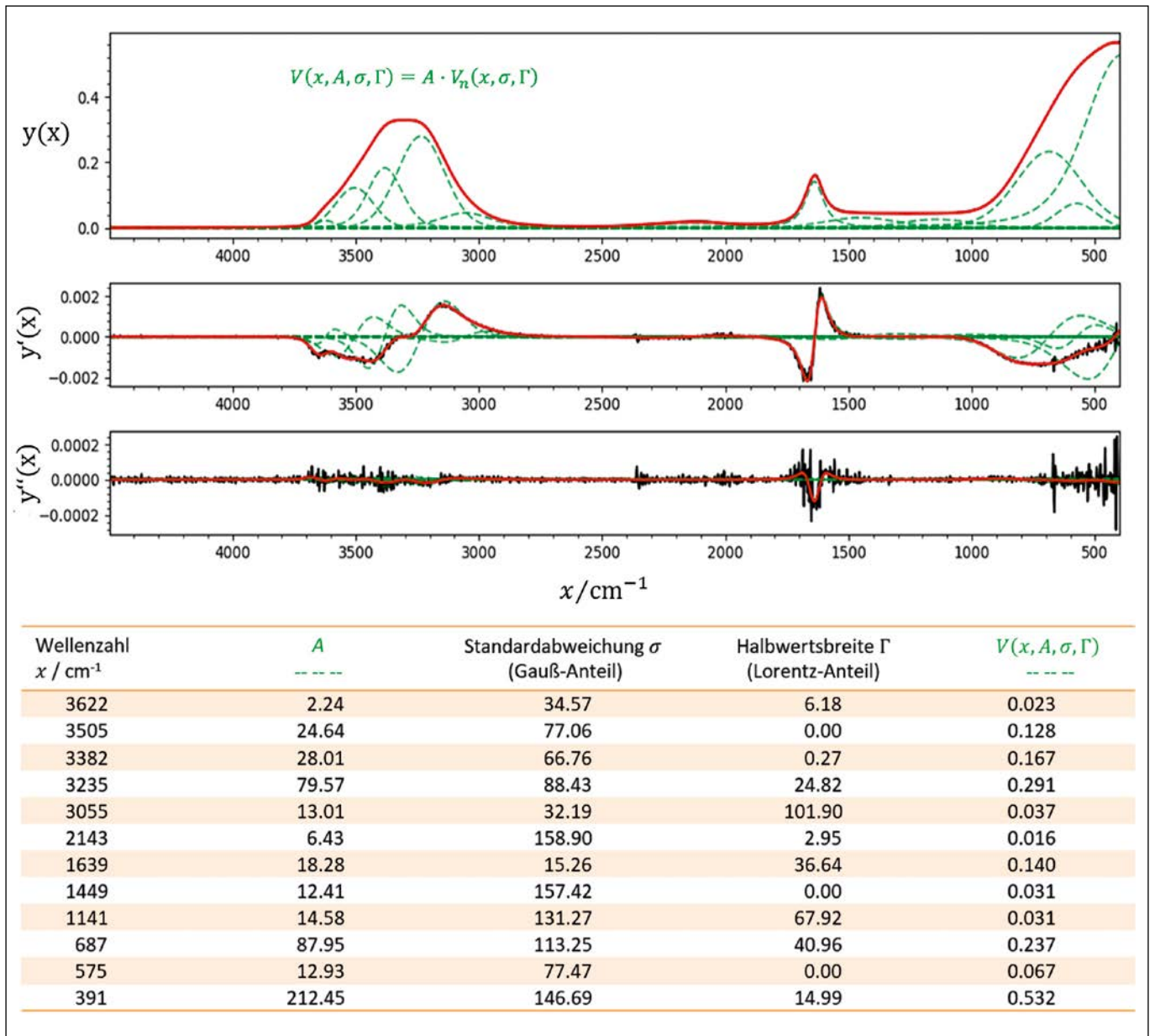


Abbildung 9: Analyse der FTIR-Spektrums von Reinstwasser: grafisch und numerisch.

Referenzen:

- [1] M. Gardegaront et al., Automation of the Peak Fitting Method in Bone FTIR Microspectroscopy Spectrum Analysis: Human and Mice Bone Study, *Journal of Spectroscopy*, 2018, doi.org/10.1155/2018/4131029
- [2] M. A. Friese, S. Banerjee, Lignin Determination by FT-IR, *Appl. Spectrosc.*, 1992, 46(2), 246–248, doi:10.1366/0003702924125456
- [3] P.H.C. Eilers, A Perfect Smoother, *Anal. Chemie*, 2003, 75, 3631-3636.
- [4] P.H.C. Eilers, Parametric Time Warping, *Anal. Chem.*, 2004, 76, 404 – 411.
- [5] M. Jakubowska. Dedicated wavelet for voltammetric signal analysis, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2007, 603, 113-123.
- [6] L. Nie, S. Wu, J. Wang, L. Zheng, X. Lin, L. Rin, Continuous wavelet transform and its application to resolving and quantifying the overlapped voltammetric peaks, *Analytica Chimica Acta*, 2001, 450, 185-192.
- [7] Pan Du, W. A. Kibbe, S. M. Lin, Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching, *Bioinformatics*, 2006, 22, 2059-2065.
- [8] J. M. Gregorie, D. Dale, R. B. van Dover, A wavelet transform algorithm for peak detection and application to powder x-ray diffraction data, *Review of scientific instruments*, 2010, 82, 015105.
- [9] Wikipedia, 2021, de.wikipedia.org/wiki/Partikelschwarmoptimierung#/media/Datei:ParticleSwarmArrowsAnimation.gif
- [10] R. Poli, J. Kennedy, T. Blackwell, Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 2007, 1, 33-57.
- [11] F. Biscani, D. Izzo, A parallel global multiobjective framework for optimization: pagmo, *Journal of Open Source Software*, 2020, 5, 2338.
- [12] M. Baldassarre, Simultaneous Fitting of Absorption Spectra and Their Second Derivatives for an Improved Analysis of Protein Infrared Spectra, *molecules* 2015, 20, 12599-12622; doi:10.3390/molecules200712599

Kontakt:



Josef Schottenbauer, M.Eng.

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

jo.schottenbauer@oth-aw.de



Niklas Zell, M.Eng.

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

ni.zell@oth-aw.de



Prof. Dr. Peter Kurzweil

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

p.kurzweil@oth-aw.de

Nanoparticles in Electrochemical Sensors: Toxicological Risk Assessment by Flow Cytometry

Prof. Dr. Peter Kurzweil
Dr. rer. nat. Christina Janko

Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Erlangen, HNO-Klinik, Kopf- und Halschirurgie, Sektion für Experimentelle Onkologie und Nanomedizin (SEON), wurden Rutheniumdioxid-Nanopartikel für die Anwendung in elektrochemischen Sensoren hinsichtlich ihrer akuten Toxizität in der Zellkultur untersucht. Unsere vorläufigen Untersuchungen mithilfe der Durchflusszytometrie zeigten keine akut toxischen Effekte in Jurkat Zellen.

Abstract

In collaboration with the University Hospital Erlangen, Department of Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery, Section of Experimental Oncology and Nanomedicine (SEON), ruthenium dioxide nanoparticles for use in electrochemical sensors were tested in cell culture for their acute toxicity. Our preliminary investigations using flow cytometry revealed no acute toxic effects in Jurkat cells.

Introduction

pH measurements in breath, blood, urine and saliva require powerful, novel technologies. Future medical pH sensors shall combine miniaturization, high accuracy, low response time, mechanical and chemical stability in strongly acid and alkaline media, even at high temperatures and pressures. The question of possible acute toxic effects of RuO₂ nanoparticles used for electrochemical sensors was investigated in cell culture using flow cytometry [1].

By the help of a novel coulometric technique, 'proton activities' of unknown solutions can be determined by directly counting electric charges at the electrode/electrolyte interface [2]. The measurement principle is based on redox-active, proton-conducting metal oxide nanoparticles that promise a molecular response to the solvated protons surrounding them [3]. This approach of pH measurement is of fundamental importance to all disciplines of science and engineering, and opens future perspectives in all fields of environmental monitoring and analytical chemistry.

What is flow cytometry?

In flow cytometry, according to Figure 1, a cell suspension is diluted with a buffer solution and aspirated through a capillary. Each cell passes individually through a laser system. The laser beam is scattered according to the morphological characteristics of the cell: in the forward direction and perpendicular to the light beam. This provides information about the size and granularity of the cells, the viability of the cells, and also shows whether the cells have taken up nanoparticles. With this device, dark colored nanoparticles do not interfere with the measurement, which is otherwise a common problem of conventional plate photometric toxicity tests.

In addition, bound fluorochromes, such as cell death markers or antibodies, are specifically excited to emit light at specific wavelengths that are measured with the respective detectors. The information for each cell is recorded. The flow cytometer used in our case (Gallios, Beckman Coulter) has three excitation lasers and ten detection filters to monitor a maximum of ten fluorescent markers simultaneously, in addition to the size and granularity of each individual cell.

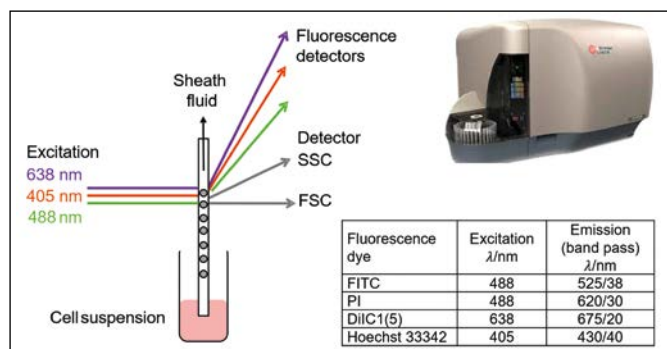


Figure 1: Principle of flow cytometry; Gallios flow cytometer (Beckman Coulter). FSC = forward scatter, SSC = side scatter.

For our multiparameter analysis, we stained the cells with the following four markers:

Annexin A5-FITC (AxV) is a dye used to study the programmed cell death (apoptosis). It has a high affinity for phosphatidylserine (PS), a plasma membrane lipid located on the inner leaflet of the cell membrane in viable cells. In the early stages of apoptosis, PS is translocated to the outer leaflet, making it accessible to AxV.

Propidium iodide (PI), a plasma membrane impermeable dye, is added to distinguish between apoptosis and necrosis. When cells lose their plasma membrane integrity, PI can penetrate the membrane and intercalate into the DNA, serving as a marker for necrosis. Viable cells are AxV and PI negative. Apoptotic cells are AxV-positive but PI-negative. Necrotic cells are AxV and PI-positive.

The carbocyanine dye DiIC₁(5) is added to assess the mitochondrial membrane potential of cells. Loss of membrane potential is indicated by decreased fluorescence and is a marker for cell stress.

Hoechst 33342 provides a clear differentiation of cells and nanoparticles in the analysis. This dye, unlike PI, is able to penetrate all cells, whether dead or alive, and stains chromatin in all nuclei.

Since all dyes emit different light spectra, it is possible to examine them all in one measurement.

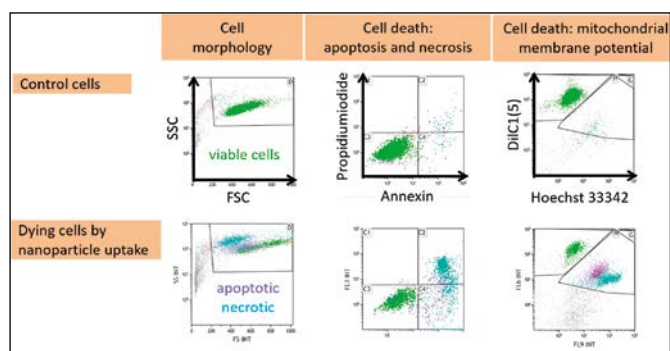


Figure 2: Example of flow cytometry measurements obtained after staining of cells with AxV, PI, DiIC₁(5) and Hoechst33342. Upper row: untreated control cells. Lower row: dying cells after treatment with toxic nanoparticles.

Figure 2 exemplarily shows raw data obtained in flow cytometry with untreated control cells (upper row) and cells treated with toxic nanoparticles (lower row).

Results

We treated Jurkat cells, an immortalized line of human T lymphocytes, with hydrous RuO₂ nanoparticles, which were won by precipitation of ruthenium trichloride in alkaline solution, washing and drying at 325 °C.

The solid particles were taken as stock solution 5 mg/mL in water and then diluted to a concentration of 1 mg/mL in the cell culture medium and treated in an ultrasonic bath for 15 min. Then concentrations of 25, 50, 100, 200 μ g/mL were incubated with the Jurkat cells (200,000/mL). After 24 hours we took aliquots of the cells and stained them with four fluorescence markers. For acute toxic particles, a response should be seen here. Hoechst 33342 distinguishes between nanoparticles and cells, AxV indicates apoptosis, PI shows necrosis, and DiIC₁(5) is a marker for healthy cells. Measurements were performed in duplicates.

Flow cytometry indicated no acute toxic effects of the ruthenium dioxide nanoparticles in the tested concentrations (Figure 3). We found no increase in apoptotic or necrotic cells, as determined by AxV and PI (top left), nor did we find loss of mitochondrial membrane potential, as measured by DiIC₁(5) (bottom left). However, the nanoparticles inhibited cell proliferation in a dose-dependent manner; this effect has been often observed with nanoparticles (Figure 3, top right). Looking at the granularity of the viable cells, a marker for nanoparticle uptake, it can be seen that the nanoparticles were hardly taken up by the cells (bottom right).

Transmission microscopy (after 48h) confirmed the findings obtained by flow cytometry. Nanoparticles were clearly visible, meaning that they occurred in cell culture medium as agglomerates (Figure 4) and were probably too large to be effectively taken up by the cells. This could also explain the low acute toxicity. In microscopy, we observed the cells to be uniformly round, with a smooth plasma membrane, which represents a healthy cells' morphology.

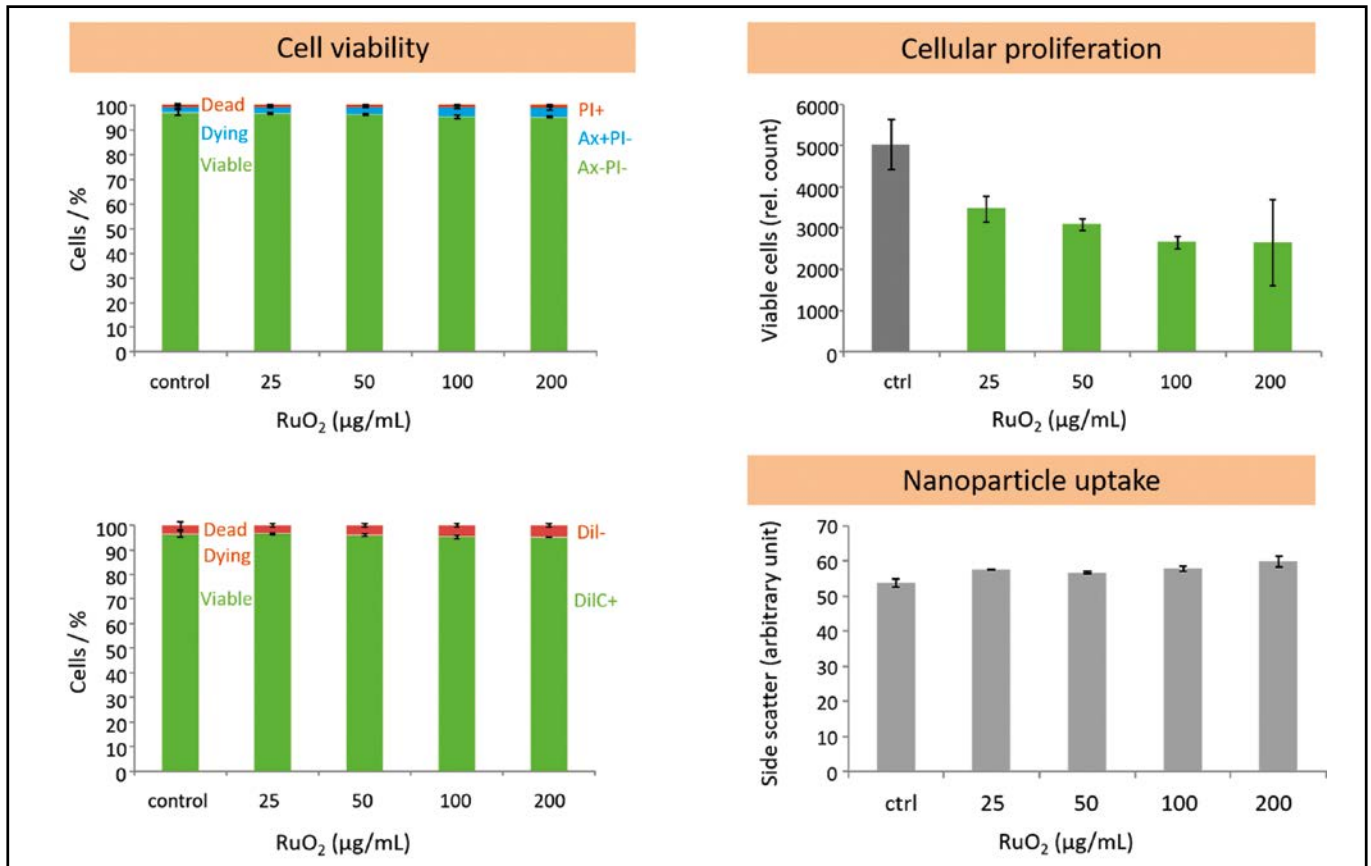


Figure 3: Effect of RuO₂ nanoparticles on viability and proliferation of Jurkat cells.

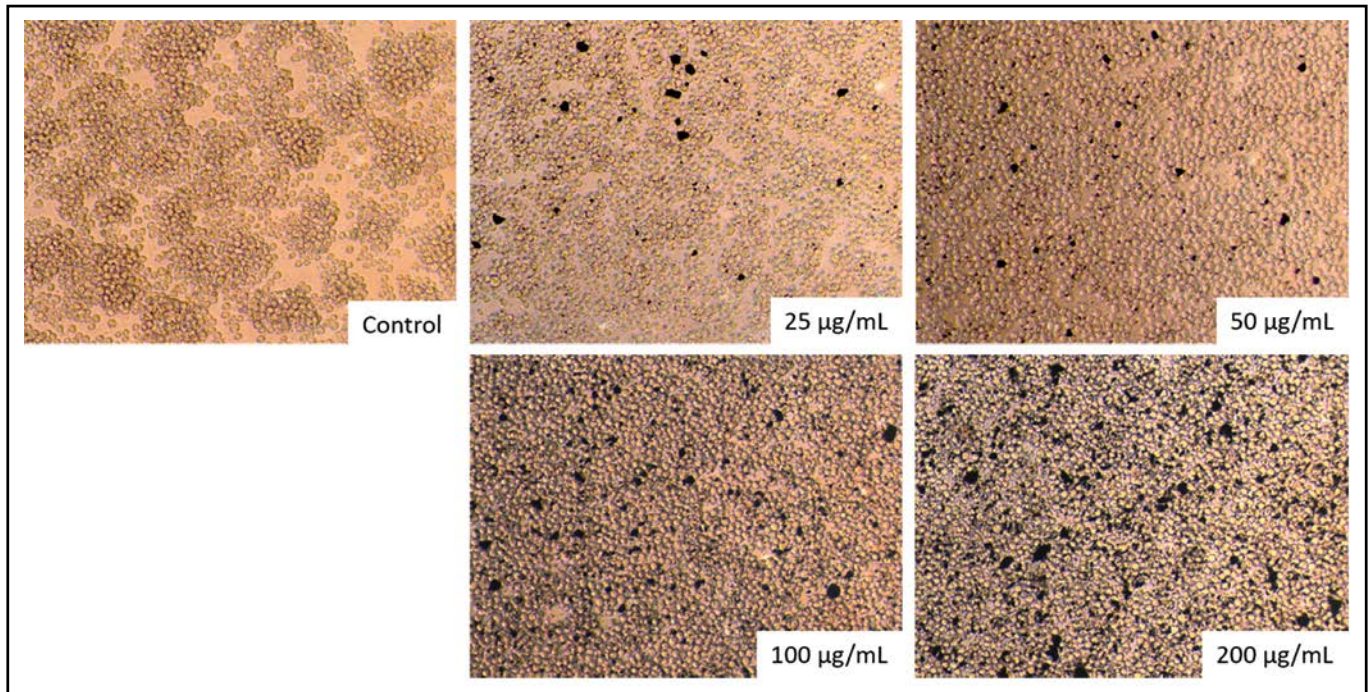


Figure 4: Transmission microscopic images of Jurkat cells, 48 hours after incubation with agglomerating RuO₂ nanoparticles at different concentrations.

Outlook

Our preliminary data show that RuO₂ nanoparticles used for the pH sensors do not induce acute toxicity when incubated for 24 hours with Jurkat cells in cell culture medium. However, not so much is known about the toxicity of RuO₂ nanoparticles or the literature data are

contradictory. More extensive experiments are needed for a conclusive toxicological evaluation. In addition, the physicochemical characterization such as particle size, charge and agglomeration of the nanoparticles in physiological solution is important and must be provided to the toxicological investigations in parallel.

References:

- [1] C. Janko, L. Munoz, R. Chaurio, C. Maueröder, C. Berens, K. Lauber, M. Herrmann, Navigation to the graveyard – induction of various pathways of necrosis and their classification by flow cytometry; *Necrosis, Methods in Molecular Biology*, Vol. 1004, 2013, pp 3-15.
- [2] P. Kurzweil, Metal Oxides and Ion-exchanging Surfaces as pH Sensors in Liquids: State-of-the-art and Outlook, *Sensors* 2009, 9, 4955-4985.
- [3] S. Chalupczok, P. Kurzweil, H. Hartmann, Ch. Schell, The redox chemistry of ruthenium dioxide: a cyclic voltammetry study, review and revision, *International Journal of Electrochemistry* (2018), doi:org/10.1155/2018/1273768.

Project partner:

Universitätsklinikum Erlangen, Hals-Nasen-Ohren-Klinik, Erlangen

Financial Support:

UMWELT nanoTECH

Projektverbund · Umweltverträgliche
Anwendungen der Nanotechnologie



funded by
Bavarian State Ministry of the
Environment and Consumer Protection



Kontakt:



Dr. rer. nat. Christina Janko

Universitätsklinikum Erlangen
HNO-Klinik
Sektion für Experimentelle Onkologie
und Nanomedizin (SEON)
Glückstraße 10a
91054 Erlangen

christina.janko@uk-erlangen.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



Bachelor-Studiengänge

Angewandte Wirtschaftspsychologie
Betriebswirtschaft
Bio- und Umweltverfahrenstechnik
Digital Business
Digital Healthcare Management
Digital Technology and Management
Elektro- und Informationstechnik
Energietechnik, Energieeffizienz und Klimaschutz
Geoinformatik und Landmanagement
Handels- & Dienstleistungsmanagement berufsbegl.
Ingenieurpädagogik
Industrie-4.0-Informatik
International Business
Internationales Technologiemanagement
Künstliche Intelligenz
Künstliche Intelligenz – International
Kunststofftechnik
Logistik & Digitalisierung
Maschinenbau
Mechatronik und digitale Automation
Medieninformatik
Medienproduktion und Medientechnik
Medizintechnik
Motorsport Engineering
Patentingenieurwesen
Physician Assistance – Arztassistenz
Physician Assistance – Arztassistenz für
Gesundheitsfachberufe
Wirtschaftsingenieurwesen

Master-Studiengänge

Angewandte Wirtschaftspsychologie
Applied Research in Engineering Sciences
Digital Business
Digital Entrepreneurship
Educational Technology
Global Research in Sustainable Engineering
Innovationsfokussierter Maschinenbau
Interkulturelles Unternehmens- und
Technologiemanagement
International Energy Engineering
International Management & Sustainability
IT und Automation
Künstliche Intelligenz
Logistik & Digitalisierung
Medientechnik und Medienproduktion
Medizintechnik
Umwelttechnologie
Wirtschaftsingenieurwesen – Digital Engineering
& Management

Weiterbildungsmaster

Arbeitsrecht
Digital Business Management
Digital Marketing
Handels- und Gesellschaftsrecht
Management im Gesundheitswesen
Medizinrecht
Steuerrecht und Steuerlehre
Technologiemanagement 4.0

WITRON Logistik + Informatik GmbH.....	28
Volksbank Raiffeisenbank Nordoberpfalz eG	28
Siemens AG	67
HORN Glass Industries AG	100
PSZ electronic GmbH	100
SGW Stadtbau GmbH Weiden	111
OTH Professional.....	111
Studien- und Career Service der OTH Amberg-Weiden	111
Stadtwerke Amberg Versorgungs GmbH	111
Amberger Freunde der OTH Amberg-Weiden e.V.....	165
F.EE Industrieautomation GmbH u. Co. KG	165
Volksbank-Raiffeisenbank Amberg eG	165
Förderverein der OTH Weiden e.V.	165
IGZ Die SAP Ingenieure	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 2022

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

Mehr Infos:



Be a **PRO**

Join **IGZ**[®]

PROfessionalität, Engagement und Qualitätsbewusstsein sind die Eckpfeiler unserer Unternehmenskultur. Wenn das auch Ihr Selbstverständnis ist, freuen wir uns auf Ihre Bewerbung. Auf Sie warten spannende Aufgaben beim Marktführer für Logistik- und Produktionssoftware mit SAP in Europa.

Zur Erweiterung unseres Teams in Falkenberg suchen wir (m/w/d):

ABSOLVENTEN

STUDIERENDE

TRAINEES / QUEREINSTEIGER

IGZ Ingenieurgesellschaft für logistische Informationssysteme mbH
Logistikweg 1 | 95685 Falkenberg | jobs@igz.com | www.igz.com

**Digitalisierung in der
Produktion & Logistik**

SAP-basierte Lehr-/Forschungsplattform
der OTH in Weiden

powered by IGZ