



**OTH  
Amberg-Weiden**

# Forschungsbericht 2026



## Vorwort/Preface

### **Liebe Leserin, lieber Leser,**

mit 43 Beiträgen aus Forschung, Entwicklung und Transfer – einem neuen Rekordwert – stellen im vorliegenden Forschungsbericht 2026 unsere vier Fakultäten ihr F&E-Engagement in einer erneut eindrucksvollen Weise vor. Die Ziele, Inhalte und Ergebnisse der Projekte, die weit überwiegend mit Partnern in und aus der Praxis erarbeitet wurden, zeigen, dass die Leitthemen Digitalisierung, Energie und Mobilität, Information und Kommunikation, Künstliche Intelligenz, Produktion und Systeme, Lebenswissenschaften und Ethik, Betriebswirtschaft und Wirtschaftspsychologie in vollem Umfang abgedeckt sind. Besonders hervorzuheben ist, dass in allen Forschungsvorhaben unser wissenschaftlicher Nachwuchs eingebunden ist und gefördert wird, ganz im Sinne auch des Promotionsrechts in forschungsstarken Feldern.

Der Forschungsbericht 2026 der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden belegt in eindrucksvoller Weise die Fortführung des überaus erfolgreichen Weges unserer Hochschule im Wissens- und Technologietransfer, der stets im engen Schulterschluss mit Fördergebern, Institutionen sowie öffentlichen und privaten Unternehmen organisiert ist.

Im vorliegenden Bericht wird deutlich, dass wir den Erfolgsweg der F&E an unserer Technischen Hochschule weiter fortsetzen, sei dies bei den eingeworbenen Drittmitteln, über Transferformate, in den fünf Technologietransferzentren oder über die Förderung von wissenschaftlichen Karrierewegen in unserem Promotionszentrum am Institut für Angewandte Forschung. 55 Doktorandinnen und Doktoranden streben diese nächste Stufe ihrer wissenschaftlichen Qualifizierung an, und wir haben die Hochschule Hof in unser Promotionszentrum REDIG mit der Hochschule Ansbach als weiteren Partner integriert.

### **Dear Reader,**

with 43 contributions from research, development and transfer our four faculties once again impressively showcase their R&D performance in this Research Report 2026. The objectives, contents and results of the projects, most of which were developed with partners in and from companies, show that the key topics Digitalisation, Energy and Mobility, Information and Communication, Artificial Intelligence, Production and Systems, Life Sciences and Ethics, Business Management and Psychology are covered in full. It is particularly noteworthy that our young scientists are involved and supported in all research projects, in line with the right to award doctoral degrees in fields with strong and excellent research competencies.

This Research Report 2026 of the Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden impressively demonstrates the continuation of our extremely successful path in knowledge and technology transfer, which is always organised in close cooperation with funding bodies, institutions as well as the public and private sector.

The present report clearly shows that we are continuing the successful path of R&D at our Technical University, whether in terms of third-party funding, transfer formats, five technological transfer centres or the promotion of scientific career paths in our Doctoral Centre at the Institute for Applied Research. 55 doctoral students are striving to reach this next level of their academic qualification, and we have integrated the University of Applied Sciences Hof as a partner into our Doctoral Centre REDIG together with the University of Applied Sciences Ansbach.

In July 2025, we hosted the Science Day of the European Metropolitan Region Nuremberg (EMN) in Amberg, the third EMN Science Day at OTH Amberg-Weiden, which has

Begleitend waren wir im Juli 2025 in Amberg Gastgeber des Wissenschaftstages der Europäischen Metropolregion Nürnberg (EMN), der bereits dritte Wissenschaftstag an unserer Hochschule, der erneut ein großer Erfolg war: Wir konnten rund 600 Gäste aus Nordbayern in den Vorträgen und Panels aus allen vier Fakultäten begrüßen, von denen gemäß Feedback 90 % aufgrund der attraktiven Inhalte nach Amberg kamen, und 41 % deshalb zum ersten Mal an einem Wissenschaftstag teilnahmen.

Die vorliegende Publikation ist ein weiterer Beleg für die Leistung und Leistungsfähigkeit der angewandten Forschung an unserer Hochschule. Wir konnten mit eingeworbenen Drittmitteln in Höhe von über 11 Millionen Euro einen neuen Rekordwert verbuchen. Im bundesweiten Vergleich erzielten wir bezogen auf die Zahl unserer Professorinnen und Professoren hier eine Größenordnung, die nahezu das Doppelte an Drittmitteln im Vergleich zum Durchschnittswert aller Hochschulen für Angewandte Wissenschaften erreicht.

Ein herzlicher Dank an alle Forscherinnen und Forscher für ihre Beiträge zum Forschungsbericht 2026, in denen Innovation und Transfer auf höchstem Niveau dokumentiert ist. Ein besonderer Dank geht auch an unsere Partner, die durch ihre finanzielle Unterstützung die Herausgabe des Forschungsberichtes 2026 möglich gemacht haben.

Allen Leserinnen und Lesern wünschen wir eine informative und spannende Lektüre!

been once again a great success: We welcomed around 600 guests from Northern Bavaria to the presentations and panels organized by all four faculties. According to the given feedback, 90% of the participants came to Amberg because of the appealing contents, and 41% were attending an EMN Science Day for the first time as a result.

This publication is proof of the strong engagement and commitment to applied research at OTH Amberg-Weiden, where we have set a new record with over 11 million Euros in third-party funding. In a nationwide comparison, we achieve a level of R&D income in regard to the number of our professors that is almost double the third-party funding achieved by all universities of applied sciences in Germany on average.

We express our sincere thanks to all our researchers for their contributions to the Research Report 2026, which present cutting edge R&D and transfer activities at OTH Amberg-Weiden. Special thanks also go to our partners, whose financial support made the publication of the Research Report 2026 possible.

We wish all of you an informative and exciting reading!



Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

Präsident der Ostbayerischen Technischen Hochschule (OTH) Amberg-Weiden



Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Weber

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

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort/Preface.....1**

## **Digitalisierung**

**Modellierung des NO<sub>2</sub>-Sterilisationsprozesses unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit ..... 6**

Magdalena Lang, M.Eng.

Julia Dietz

Prof. Dr.-Ing. Marc Hainke

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Doris Ruider

Dr.-Ing. Bernhard Schmitt

**Comparison of different fluid models of the dense vapor fluid Hexamethyldisiloxane (MM).....10**

Philipp Streit, M.Eng.

Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß

**Integrierte Verwaltung und Steuerung eines automatisierten Vertikallift-Lagers mit SAP S/4 EWM .....16**

Christoph Hammer, M.A.

Annika Stahl, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Günter Kummetssteiner

**Entwicklung und Test eines multimodalen Steuerungssystems (Gesten und Sprache) für eine automatisierte Verladebrücke ..... 21**

Prof. Dr.-Ing. Armin Wolfram

**Vorlesungsbegleitende Förderung der Ableitungs- und Integrationsfertigkeiten von Studierenden durch einen digitalen Selbstlernbaustein – Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Abschlusstest und Klausurleistung in einer Mathematikvorlesung an der OTH Amberg-Weiden ..... 28**

Prof. Dr. paed. Dipl.-Math. Mike Altieri

Katja Dechant-Herrera, M.A., B.Sc.

Prof. Dr. Leonhard Riedl

**Gamification in der Lehre: Motivationshilfe, nerviges Beiwerk – oder beides? ..... 34**

Prof. Dr. Mike Altieri

Katja Dechant-Herrera, M.A., B.Sc.

Prof. Dr. Leonhard Riedl

**Lernprozessbezogene Studierendenwahrnehmung von Lightboardvideos mit Interaktionen in einer digitalen Selbstlerneinheit zur Wiederholung der Grundlagen der Differenzial- und Integralrechnung..... 39**

Prof. Dr. Leonhard Riedl

Katja Dechant-Herrera, M.A., B.Sc.

Prof. Dr. paed. Dipl.-Math. Mike Altieri

**Die Amberger Zahlen der Ahnenforschung = ein genealogischer Gesamtverwandtschaftsindex.... 44**

Prof. Dr.-Ing. Dominikus Heckmann

Klara, Philipp und Johannes Dahlen

## **Energie und Mobilität**

**Untersuchung einer KI-Strategie zur Optimierung der Aerodynamik von Rotorblättern für Kleinwindenergieanlagen..... 50**

Prof. Dr.-Ing. Stefan Beer

Dr.-Ing. Daniel Hummel

Patrick Mlotzek, M.Eng.

Peter Sander, M.Sc.

**Development of a Floating Turbine Coil Pump for Irrigation Purposes in Emerging Countries ..... 56**

Axel Popp, M.Eng.

Rodi Attou

Nikil Bansode, B.Tech.

Clemens Heuermann, B.Eng.

Mohamed Salih, M.Eng.

Leonid Tomko, M.Eng.

Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth

Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß

## Künstliche Intelligenz

### Testfeld für intelligente Infrastruktur in Amberg..... 62

Martin Fischer, M.Sc.  
Heike Lepke, M.Eng.  
Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß

### KI-Anwendungen im IT-Service-Umfeld ..... 67

Prof. Dr. Frank Schäfer

### KI-Tutoringsysteme in der Hochschullehre – Erfahrungen aus dem Einsatz von OneTutor.....72

Prof. Dr. habil. Mandy Hommel  
Prof. Dr. Sandra Rebholz  
Prof. Dr. Nada Sissouno

### Hey ALEX, teach me to sell this pen – Ergebnisse eines lehrintegrierten Forschungsprojekts zum Einsatz GenKI-basierter Avatare für Verkaufstrainings .....79

Prof. Dr. Julia Heigl  
Prof. Dr. Hannes Huttelmaier

### KI-basierte Lebensdauervorhersage von additiv gefertigten AlSi10Mg-Bauteilen unter Berücksichtigung des Eigenerwärmungseffekts und der Position auf der Bauplattform ..... 84

Dr. Martin Matušů  
Bastian Roidl, M.Eng.  
Prof. Dr. Jakob Rosenthal  
Dr. Jan Papuga  
Dr. Petr David

### Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur Optimierung der Rezeptierung und der Produktionsparameter von duroplastischen Quarzkompositen ..... 89

Marco Süß, M.Eng.  
Prof. Dr. Peter Kurzweil

## Lebenswissenschaften und Ethik

### Hygiene und Medizintechnik – Analyse von Material- veränderungen bei der Aufbereitung chirurgischer Instrumente mit einem neuartigen Biozid ..... 96

Prof. Dr. Sebastian Buhl  
Alexander Stich, M.Sc.  
Miguel Idarraga, M.Sc.  
Prof. Dr. med. Clemens Bulitta

### Implementierung der elektrischen Impedanztomo- graphie in der klinischen Praxis: Potenziale und Herausforderungen ..... 102

Prof. Dr. Dr. Stefanie Steinhauser  
Jana Hetzer, M.Sc.

### Innovative Lernräume in der Anatomie-Lehre ..... 107

Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang  
Sonja Waldt, M.Sc.  
David Powering, M.Sc.

### Proof of Concept eines 3D-gedruckten Herzphantoms für SPECT-CT Diagnostik und In-Vitro TLD-Dosimetrie ..... 112

Agnes Pöllmann, M.Sc.  
Dr. Daniel Schmidt  
Prof. Dr. Dirk Hellwig  
Prof. Dr. Ralf Ringler

### Simulationen beschleunigen die Prüfungsverfahren der ASTM F2213 & F2052 für Implantate bei der MRT-Diagnostik ..... 116

Joshua Igl, M.Sc.  
Noel Dario Jander, M.Sc.  
Theresa Schwab, B.Eng.  
Gregor Schaefer  
Prof. Dr. Ralf Ringler

## Produktion und Systeme

### Entwicklung eines skalierbaren, bidirektionalen DC/DC- Wandlers auf Basis von Standard-Wechselrichtern ..... 120

Anton Braumüller, B.Eng.  
Jannik Hirtel, B.Eng.  
Jan Herold, M.Sc.  
Dominik Großmann, M.Sc.  
Prof. Dr.-Ing. Heiko Zatocil

### Biofilter: Intelligente Feuchtemessung in Hack- schnittelschüttungen für die Abgasreinigung ..... 126

Stefan Wiendl, M.Eng.  
Prof. Dr. Peter Kurzweil  
Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger

### Sensorarrays: Ein visionärer Weg zur elektrochemischen Zunge ..... 130

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

### Iridium dioxide as a voltammetric pH sensor: Influences of acidity, conductivity and electrode age ... 135

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

### Demonstrationsversuche zur Rückgewinnung von kritischen Metallen ..... 140

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

<b>Volumenberechnung mit Hilfe von Schwerpunktfasern ..144</b> Prof. Dr. Harald Schmid	<b>Betriebswirtschaft &amp; Wirtschaftspsychologie</b>
<b>Einfluss von statischen Magnetfeldern auf das Wachstum von Mikroalgen .....148</b> Prof. Dr. Christoph Lindenberger Prof. Dr. Bernhard Frenzel Alexander Reinhardt, M.Sc. Nico Pilz Sebastian Betz Matthias Maderer	<b>Marketings Intellectual Journey – 131,536 Articles Unveiled .....193</b> Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.) Patrick Baretto
<b>Methode zur Quantifizierung der Inhibierung der Methanproduktion durch die Makroalge <i>Asparagopsis taxiformis</i>..... 153</b> Simon Schneider, B.Eng. Singh Rickwinder, M.Tech. Bendix Wojaczek, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger	<b>Design for an approach of Rapprochement between Marketing Science and the Metaverse in Cyber-physical Realities.....198</b> Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.) Patrick Baretto Prof. Dr. Marcus Becker
<b>Metabolic activity as a quantitative tool for biomass determination of suspension cultures of Basidiomycota .....158</b> Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger Saikrishnan Kandaswamy, M.Sc. Alexander Reinhardt, M.Sc. Minho Kim Anna Juliane Kuhn	<b>History of Management Science: A Quest for Identify, Raison D'être and Future ..... 204</b> Patrick Baretto Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)
<b>Entwicklung eines abgastoleranten <i>Scenedesmus obliquus</i>-Stammes durch adaptive Labor-Evolution ....163</b> Sebastian Linhardt, M.Eng. Sun-Hwa Jung, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger Prof. Dr.-Ing. Marco Taschek	<b>The History of Design Thinking – From Pragmatism to Phenomenology..... 210</b> Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)
<b>Charakterisierung und Optimierung der Oberflächeneigenschaften von additiv gefertigten 316L-Komponenten durch Laserbehandlung.....168</b> Dr. Feng Chen Prof. Dr.-Ing. Jürgen Koch	<b>Designing AI-Driven Product Management in SMEs: An Effectuation-Based Framework for Decision-Making under Uncertainty .....216</b> Livia Ana Maria Craciun Patrick Baretto Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)
<b>Effiziente Methode zur stützstrukturarmen Topologieoptimierung für die additive Fertigung..... 174</b> Patrick Biehler, M.Eng. Prof. Dr. Jakob Rosenthal	<b>Computational Synthesis of Dementia Research: Convergence Framework for Integrated Care..... 221</b> Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.) Patrick Baretto
<b>Konzeption und Realisierung eines thermisch aktivierten Greifsystems mittels 4D-Druck .....180</b> Michael Keilbach, B.Eng. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl	<b>Online-Hassrede gegen Minderheiten am Beispiel von weiblichen Gründerinnen: Quantitative Medieninhaltsanalyse von YouTube-Kommentaren ..... 226</b> Hana Dabdoub, M.A. Prof. Dr. Gabriele M. Murry, M.B.A. (USA), M.H.R. (USA)
<b>Sensorarrays: Optimierte Iridiumdioxid Beschichtungen für elektrochemische Sensoren .....187</b> Josef Schottenbauer, M.Eng. Christof Dinkelbach, M.Eng. Prof. Dr. Peter Kurzweil	<b>Evaluation of the Educational Impact of the Simulation Development Process through Co-Creation ..... 230</b> Md Jawadur Rahman, M.A. Prof. Dr. Gabriele M. Murry, M.B.A. (USA), M.H.R. (USA)
	<b>Inserentenverzeichnis .....235</b>
	<b>Impressum..... 236</b>

# Modellierung des NO<sub>2</sub>-Sterilisationsprozesses unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit

## Zusammenfassung

Das Stickstoffdioxid-Sterilisationsverfahren ist eine neuartige Sterilisationsmethode in der Gruppe der Niedertemperatur-Gas-Verfahren. Mit numerischen Studien wurde der Einfluss verschiedener Modellparameter untersucht.

## Abstract

The nitrogen dioxide sterilization process is a novel sterilization method in the group of low-temperature gas processes. Numerical studies were used to investigate the influence of various model parameters.

## 1 Einleitung

Medizinprodukte unterliegen hohen hygienischen Anforderungen, zum Schutz der Patienten vor Infektionen [1]. Nach der ISO 14937 ist ein Sterilitätssicherungs-niveau (SAL) von  $1 \times 10^{-6}$  festgelegt. Dies bedeutet, dass ein Medizinprodukt als steril bezeichnet werden kann, wenn die Wahrscheinlichkeit für das Auffinden eines lebensfähigen Keims bei  $SAL = 1 \times 10^{-6}$  beträgt. Damit diese Standards eingehalten werden, ist eine Sterilisation von verpackten Medizinprodukten notwendig. Diese kann unter anderem durch Niedertemperatur-Gas-Verfahren wie dem Ethylenoxid (EO)-Verfahren, dem Niedertemperatur-Dampf-Formaldehyd-Verfahren oder dem Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)-Sterilisationsverfahren durchgeführt werden [1, 2]. Das NO<sub>2</sub>-Verfahren ist eine neuartige Alternative zu den beiden anderen Verfahren [3].

## 2 Der Stickstoffdioxid-Sterilisationsprozess

Die Abbildung 1a zeigt als eine exemplarische Anwendung für den NO<sub>2</sub>-Sterilisationsprozess eine im Blister verpackte vorgefüllte Spritze. Typische Prozessparameter sind ein Vakuum von 20 bis 500 Torr, damit das Sterilisationsgas in die Verpackung gelangt [4] und eine relative Luftfeuchtigkeit (RH) von 40-80 %, wobei aus der Literatur bekannt ist, dass eine höhere RH zu einer schnelleren Letalität und somit zu kürzeren Zykluszeiten führt [5].

Die Prozessanalyse beschränkt sich auf einen Einströmungszyklus, wie in der Abbildung 1b gekennzeichnet.

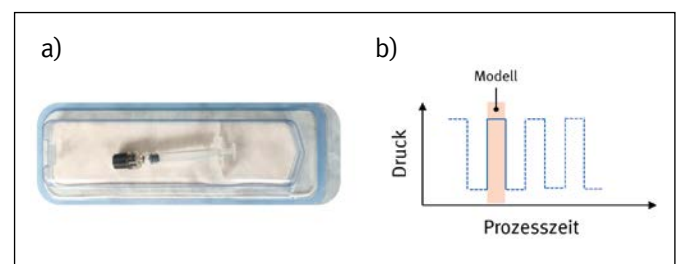


Abbildung 1: a) Vorgefüllte Spritze als Beispiel für die Anwendung des NO<sub>2</sub>-Sterilisationsprozesses [2] und b) schematischer Druckverlauf im System während der Sterilisation. Bei der Prozessmodellierung wird ein Druckzyklus betrachtet (orange Kennzeichnung).

## 3 Prozessmodellierung

Der Volumenstrom in die Verpackung durch die gasdurchlässige Tyvek-Folie [4] wird durch ein transientes laminares Strömungsmodell modelliert. Aufgrund der sehr großen Druckänderung wird das NO<sub>2</sub>-Gas als kompressibles Medium behandelt und damit die Dichte mit dem idealen Gasgesetz ermittelt. Der Volumenstrom durch die Folie ist proportional zur Druckdifferenz zwischen dem Systemdruck und dem Druck innerhalb der Verpackung und wird als Geschwindigkeits-Randbedingung der Form

$$c_{in} = \alpha \Delta p$$

modelliert. Der Faktor  $\alpha$  beinhaltet insbesondere die Permeabilität  $K$  der Folie, die durch einen Abgleich mit den Parametern aus der Bendsten-Porositätsmessung gemäß ISO 5636-3 ermittelt wurde. Die Materialeigenschaften des Gases sind so angepasst, dass sie den Eigenschaften feuchter Luft entsprechen, um den Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit [6]

$$RH = \frac{p_v}{p_{sv}}$$

mit dem Dampfdruck  $p_v$  und dem Sättigungsdruck  $p_{sv}$  bewerten zu können. Die Korrelationen sind der Literatur entnommen, so kann beispielsweise die Viskosität des Gases

$$\mu_m = \frac{(1 - x_v) \cdot \mu_a}{(1 - x_v) + x_v \cdot \phi_{av}} + \frac{x_v \cdot \mu_v}{x_v + (1 - x_v) \cdot \phi_{va}}$$

mithilfe des molaren Anteils des Wasserdampfes  $x_v$ , der dynamischen Viskosität von Luft  $\mu_a$ , der dynamischen Viskosität des Wasserdampfes  $\mu_v$  und den Interaktionsparametern  $\Phi$  berechnet werden [7]. Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Verlauf der dynamischen Viskosität und der Wärmeleitfähigkeit des Gases für unterschiedliche Werte der Luftfeuchtigkeit  $RH$  in einem Temperaturbereich von 0 bis 100 °C. Erst bei Temperaturen ab ca. 50 °C zeigt sich ein merklicher Einfluss der Luftfeuchtigkeit, wobei eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit zu einer Verkleinerung der Stoffwerte führt.

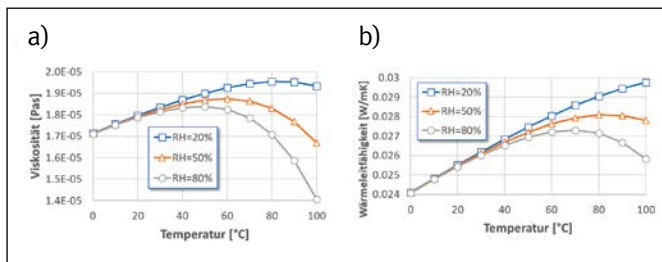


Abbildung 2: Temperaturabhängigkeit der a) Viskosität und der b) Wärmeleitfähigkeit des Gases für eine relative Luftfeuchtigkeit von 20 % (blau), 50 % (orange) und 80 % (grau).

#### 4 Numerische Studien

Im Vorhaben werden grundlagenorientierte Untersuchungen zum Sterilisationsprozess durchgeführt. Die CFD-Berechnungen erfolgen mit der Software Ansys Fluent [8]. Um den Einfluss geometrischer Parameter auf das Strömungsverhalten in Engstellen zu analysieren, wurde ein einfaches geometrisches Modell implementiert (Abbildung 3a). Dabei wird der Durchmesser einer Kanüle variiert und der resultierende Volumenstrom bei ansonsten gleichen Parametern ausgewertet. Abbildung 3b zeigt den zeitlichen Verlauf der Strömung, ausgedrückt durch die Reynolds-Zahl basierend auf der lokalen Strömungs-

geschwindigkeit. Bei größeren Durchmessern der Kanüle resultieren deutlich stärkere Strömungen bei grundsätzlich gleichem zeitlichem Verlauf. Die Werte der Reynolds-Zahl bestätigen die Annahme einer laminaren Strömung. Die Variation der Luftfeuchtigkeit ergibt im betrachteten Parameterbereich keinen wesentlichen Einfluss auf die Modellergebnisse.

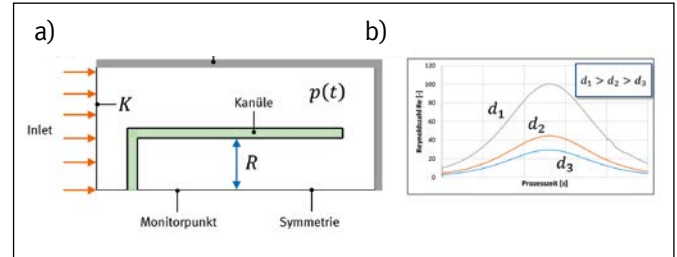


Abbildung 3: a) Einfache Rechengeometrie zur Untersuchung des Einflusses des Durchmessers der Kanüle auf den Gasfluss und b) zeitlicher Verlauf des Volumenstroms ausgedrückt durch die Reynolds-Zahl der Strömung bei verschiedenen Durchmessern.

Da im vorliegenden Modell der Volumenstrom als Funktion der Permeabilität  $K$  als Randbedingung implementiert ist, wurde weiterhin eine Sensitivitätsanalyse dieses Parameters durchgeführt. Abbildung 4 zeigt den resultierenden Druckverlauf  $p^+ = p(t)/p_0$ . Wie erwartet ergeben sich bei kleineren Werten der Permeabilität größere Prozesszeiten bis zum Druckausgleich innerhalb der Verpackung.

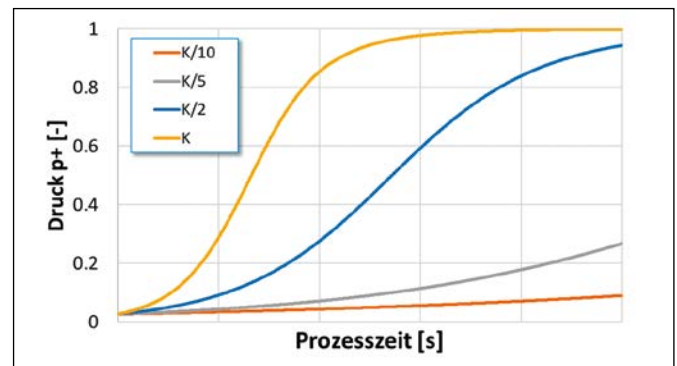


Abbildung 4: Die angenommene Permeabilität der Tyvek-Folie hat einen signifikanten Einfluss auf den zeitlichen Verlauf des Drucks im System.

#### 5 Fazit

Durch die Modellierung kann der grundsätzliche Einfluss verschiedener Modell- und Prozessparameter effizient bewertet werden. Der Einfluss wesentlicher Parameter, wie z. B. die Permeabilität als Randbedingung, ist bei der Interpretation der Ergebnisse von besonderer Bedeutung.

---

**Referenzen:**

- [1] E. Wintermantel, Medizintechnik: Interdisziplinarität, Biokompatibilität, Technologien, Implantate, Diagnostik, Werkstoffe, Zertifizierung, Business = Life science engineering, Verlin: Springer, 2009.
- [2] M. Bischof, A. Gillet, E. Haghedooren, E. Offermann und B. Zeiss, „Prefilled ophthalmic syringes – New possibilities in terminal sterilization,“ in 20th PDA Universe of Pre-Filled Syringes and Injection Devices Conference, Gothenburg, Sweden, 2023.
- [3] E. Goulet und E. Robbins, „Prefilled Syringe Sterilization – NO<sub>2</sub> Sterilization: A Flexible Soution for Prefilled Syringes“, Drug Development & Delivery, Bd. 14, Nr. 8, pp. 75-80, 2014.
- [4] D. Opie und A. Gillet, „Successfully Execute a Nitrogen Dioxide (NO<sub>2</sub>) Sterilization Validation for a Drug in a Pre-filled Syringe“, Sterigenics, 27 Mai 2021. [Online]. Available: [www.sterigenics.com](http://www.sterigenics.com). [Zugriff am 26 August 2025].
- [5] Sterigenics, „NO<sub>2</sub>-Sterilisation – Übersicht“, 2018. [Online]. Available: [www.sterigenics.com](http://www.sterigenics.com). [Zugriff am 26 August 2025].
- [6] R. Müller, Thermodynamik, E-Content Generic Vendor, 2014.
- [7] P. T. Tsilingiris, „Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C“, Energy Conversion and Management, Bd. 49, pp. 1098-1110, 2008.
- [8] Ansys: [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

**Projektpartner:**

Gerresheimer Regensburg GmbH, 92442 Wackersdorf

## 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](mailto:m.hainke@oth-aw.de)



**Magdalena Lang, M.Eng.**

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



**Julia Dietz**

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

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



**Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Doris Ruider**

Gerresheimer Regensburg GmbH  
Medical Systems  
Oskar-von-Miller-Straße 6  
92442 Wackersdorf

[doris.ruider@gerresheimer.com](mailto:doris.ruider@gerresheimer.com)



**Dr.-Ing. Bernhard Schmitt**

Gerresheimer Regensburg GmbH  
Medical Systems  
Oskar-von-Miller-Straße 6  
92442 Wackersdorf

[bernhard.schmitt@gerresheimer.com](mailto:bernhard.schmitt@gerresheimer.com)

# Comparison of different fluid models of the dense vapor fluid Hexamethyldisiloxane (MM)

## Zusammenfassung

Die nachfolgende Arbeit untersucht Fluidmodelle für die CFD-Optimierung (Computational Fluid Dynamics) der Radial-Re-Entry-Turbine „Elektra“ [1]. Anders als Dampfturbinen arbeitet sie mit dem organischen Arbeitsmedium Hexamethyldisiloxan (MM), dessen Verhalten deutlich von dem eines idealen Gases abweicht. Die Simulationen wurden in FineTurbo [2] durchgeführt und nutzten entweder auf REFPROP basierende Dampftabellen [3] oder vereinfachte Idealgas-Ansätze. Zunächst werden die Eigenschaften von MM beschrieben und anschließend werden drei Modelle – SW-EOS (Span-Wagner Equation of State), Idealgas und Idealgas mit Virialkoeffizienten – miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden dann in CFD bewertet, um zu ermitteln, ob vereinfachte Modelle den genaueren, aber rechenintensiveren Realgas-Ansatz ersetzen können.

## Abstract

This work examines fluid models for CFD (Computational Fluid Dynamics) optimization of the radial re-entry turbine *Elektra* [1]. Unlike steam turbines, it operates with the organic fluid hexamethyldisiloxane (MM), whose behavior deviates strongly from an ideal gas. Simulations were performed in FineTurbo [2], using either REFPROP-based look-up tables [3] or simplified ideal-gas approaches. The study first outlines MM's properties, then compares three models – SW-EOS (Span-Wagner Equation of State), Ideal Gas, and Ideal Gas with Virial Coefficients – and evaluates their CFD performance to determine whether simplified models can replace the more accurate but more computer time consuming real-gas approach.

## 1 Hexamethyldisiloxane (MM) Fluid Information

The medium used in the turbine is Hexamethyldisiloxane (MM), which is an organic medium, also called a dense vapor. The Equation below shows the compressibility factor  $Z$ , with the pressure  $p$ , the specific volume  $v$ , the number of mol  $n$ , the universal gas constant  $R$  and the Temperature  $T$  of the considered medium.

$$Z = \frac{pv}{nRT}$$

$Z$  shows the deviation from the ideal gas behavior of the considered fluid. For an ideal gas, the compressibility factor  $Z = 1$ . Real gases deviate from this. At high pressure and low temperature,  $Z$  can differ significantly. If  $Z > 1$ , molecular volume dominates and the gas is less

dense than ideal; if  $Z < 1$ , intermolecular forces dominate, making it denser than an ideal gas.

$$\Gamma = 1 + \frac{\rho}{c} \left( \frac{\delta c}{\delta \rho} \right)_s$$

The fundamental derivative  $\Gamma$ , defined with density  $\rho$ , speed of sound  $c$ , and entropy  $s$ , describes how the speed of sound of the considered fluid changes with density during isentropic processes. Wave and shock propagation in dense vapors depend strongly on  $\Gamma$ : if  $\Gamma > 1$ , the speed of sound decreases during expansion and increases during compression; if  $\Gamma < 1$ , the opposite occurs. The compressibility factor and the fundamental derivative of gas dynamics can be calculated with the

Table 1: Fundamental derivative and compressibility factor for given boundary conditions at isentropic expansion in a nozzle

Position	Pressure in kPa	Temperature in K	Entropy in kJ/kg	Compressibility factor Z	Fundamental derivative	Specific heat ratio
Inlet	650	463	0.78766	0.79273	0.7627	1.0957
Outlet	55	425.55	0.78766	0.97985	0.9961	1.0325

known fluid data. This is done by a CoolProp [4] Python interface with REFPROP backend. Table 1 shows the calculated values.

Table 1 shows that the compressibility factor rises from  $Z \approx 0.8$  at the inlet of the nozzle to nearly  $Z \approx 1.0$  at the outlet, meaning real-gas effects are strongest at the start of expansion and weaker downstream. The fundamental derivative follows the same trend, increasing from 0.76 to 0.99, indicating the nozzle region is most affected. Near critical conditions  $\Gamma$  can even become negative, classifying MM as a BZT (Bethe – Zel’dovich – Thompson) fluid [5].

## 2 Fluid Models

To be able to better classify these deviations from the behavior of the ideal gas, the real gas model that is used for the CFD simulations, an Ideal Gas Model and an Ideal Gas Model considering compressibility are described in the following section.

### 2.1 REFPROP Fluid Database Span-Wagner EOS (SW-EOS)

Like already mentioned above, the CFD Software can work with look up tables generated from REFPROP thermodynamic and transport properties database. REFPROP references the 12 Parameter Span Wagner EOS [6] for the fluid Hexamethyldisiloxane (MM). The SW-EOS is expressed in terms of the Helmholtz energy in the reduced form. It is split in two parts, first the ideal gas behavior  $\Psi^{ig}$  and second the influence of intermolecular forces  $\Psi^r$ :

$$\frac{\Psi(T, \rho)}{RT} = \frac{\Psi^{ig}(T, \rho) + \Psi^r(T, \rho)}{RT}$$

This EOS is implemented into the CFD Fluid Model by generating look up tables from REFPROP via the tool TabGen [7].

### 2.2 Ideal Gas Model (PIG)

As a first starting point for the comparison of the different fluid models, the ideal gas model will be compared to the Span-Wagner real gas model. The ideal gas model bases on the following equations.

$$pv = nRT$$

With the pressure  $p$ , specific volume  $v$ , universal gas constant  $R$ , number of moles  $n$  and the Temperature  $T$

of the fluid. And in another formulation with the density of the fluid:

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

Figure 1 compares the density gradient of the ideal gas and real gas models along the isentropic expansion over a normalized distance along the expansion line in a supersonic nozzle. The largest deviation occurs at the inlet ( $\approx 0.79$ ) and decreases towards the outlet ( $\approx 0.98$ ). These values align with the compressibility factors in Table 1, confirming that  $Z$  represents the density difference between ideal and real gas behavior.

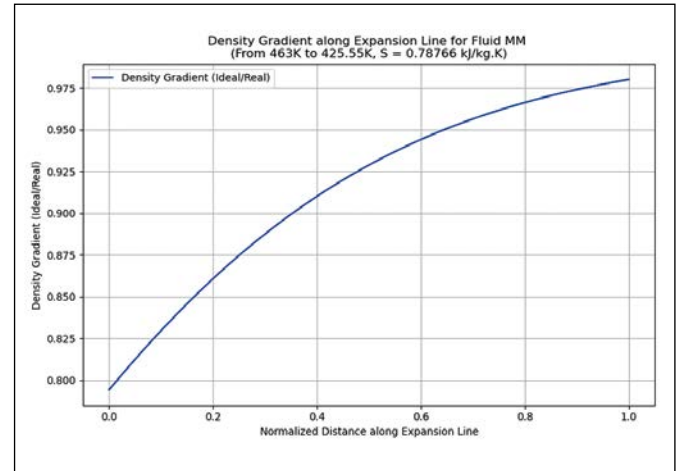


Figure 1: Density gradient distribution along the expansion line

The significant deviation of  $Z \neq 1$  makes it clear that the ideal gas model is rather unsuitable for the consideration of this fluid. For this reason, an extension of the ideal gas model is considered below to reduce the deviations of the models.

### 2.3 Ideal Gas Model with Virial Coefficients (PIG+Z)

To address the shortcomings of the ideal gas model, the Virial Equation of State (VEOS) is considered. Virial coefficients, introduced by Thiesen [8] and expanded by Kamerlingh Onnes [9], are temperature-dependent and account for fluid compressibility. They are based on statistical mechanics and intermolecular potentials, but in practice are usually derived from experimental  $p - \rho - T$  data. Since the series is infinite, it must be truncated after a few terms, with the ideal gas law as its basis.

$$Z = \frac{p}{\rho_m RT} = 1 + B\rho_m + C\rho_m^2 + \dots$$

Where  $Z$  stands for the compressibility of the fluid,  $\rho_m$  for the molar density and  $B$  and  $C$  for the first and second virial coefficient. To determine the virial coefficients of the used fluid, pressure, density and temperature measurements should be carried out. In this work, no measurements will be done, but the data will be used from the REFPROP Fluid database instead. The fluid database therefore replaces the measurements that would normally have to be carried out. For a first consideration, the values for the compressibility at the inlet temperature and the inlet pressure of the turbine will be calculated.

$$Z_1 = \frac{6.5 \times 10^5 \text{ Pa}}{213.1 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} * 8.314 \frac{\text{J}}{\text{molK}} * 463 \text{ K}} = 0.792$$

The equation for the compressibility with the molar density from above can be used and rewritten as follows:

$$\frac{Z - 1}{\rho_m} = B + C\rho_m$$

In this form, the calculation reforms to a simple equation for a linear slope. The second virial coefficient  $B$  then stands for the point where the line would cut the y-axis and the third virial coefficient  $C$  then stands for the slope of the linear function. For this simplified calculation, the equation is already truncated at the second term. With the calculated values of the compressibility from above, points can be drawn and can relate to linear regression. The values for the second and the third virial coefficient can then be calculated, and the equation can be formed as follows:

$$Z_{463\text{K}} = 1 + (-9.7251 \times 10^{-4})\rho_m + (-6.8455 \times 10^{-8})\rho_m^2$$

This virial equation then stands for the compressibility for different values of  $\rho_m$  of the fluid for a given temperature, in this equation 463K. These equations for the compressibility over the virial coefficients can now be carried out for the complete temperature range under consideration. A matrix for the compressibility over temperature (463 K to 425.55 K) and molar density can then be created.

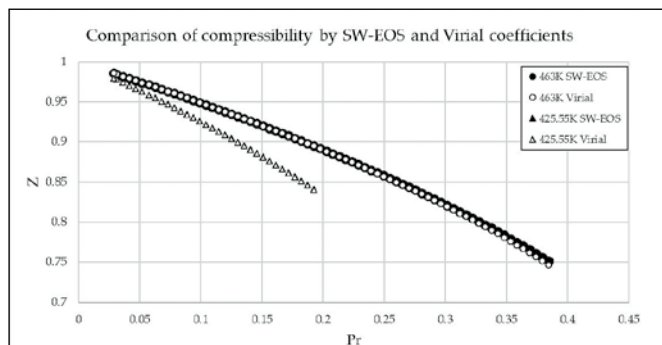


Figure 2: Comparison of the compressibility factor from the SW-EOS and the virial coefficients for 463 K and 425.55 K

Figure 2 compares  $Z$ -development of the SW-EOS with compressibility from virial coefficients as function of the

reduced pressure (a reduced pressure of 1 is the critical pressure of the considered fluid). At 463 K, both agree well, with deviations increasing slightly between reduced pressures of 0.25–0.4, reaching a maximum difference of only 0.34 % (SW-EOS higher). At 425.55 K, no noticeable difference occurs.

### 3 CFD Calculations and Comparison of the different fluid models

The fluid models from section 2 were applied in CFD to enable rapid turbine geometry optimization. The key question is whether simpler fluid models can further cut runtime without distorting results.

- **SW-EOS:** Implemented via TabGen, generating REFPROP look-up tables
- **PIG:** Based on averaged inlet/outlet values of the isentropic exponent  $\kappa$  and the specific heat capacity at constant pressure  $c_p$ .
- **PIG+Z:** The compressibility in the software is calculated by:

$$Z = \frac{(\int_{T_0}^T (c_p - c_v) dT)}{RT}$$

In this equation, the user can define  $\kappa(T)$  and  $c_p(T)$  profiles. Since compressibility from virial coefficients closely matches SW-EOS (Figure 2), REFPROP values for  $c_p$  and  $\kappa$  are applied. To include pressure effects, values are taken at turbine inlet (463 K, 650 kPa) and outlet (425.6 K, 55 kPa) conditions, with intermediate points interpolated linearly.

### 4 Results

Table 2 compares calculated mass flow rate and runtime. The design mass flow rate is 0.3 kg/s; SW-EOS predicts 0.301 kg/s, PIG+Z 0.261 kg/s (87 %), and PIG 0.189 kg/s (63 %). Despite using larger look-up tables, SW-EOS is only slightly slower, with PIG+Z requiring 88 % and PIG 73 % of its runtime.

Table 2: Results of the CFD simulation for the different fluid models

	PIG	PIG with Z	SW-EOS
Mass flow rate in kg/s	0.189	0.261	0.301
Mass flow rate deviation to SW-EOS in %	-37.21	-13.29	-
Calculation time in s	10894	13154	14892
Calculation time deviation to SW-EOS in %	-26.9	-11.7	-

Figure 3 (top left) shows the density distribution of the three fluid models along the nozzle up to the critical cross-section (dimensionless length = 1). Large deviations are visible: SW-EOS reaches  $\approx 32.5 \text{ kg/m}^3$ , PIG+Z just over  $20 \text{ kg/m}^3$ , and PIG only  $\approx 10 \text{ kg/m}^3$ . These

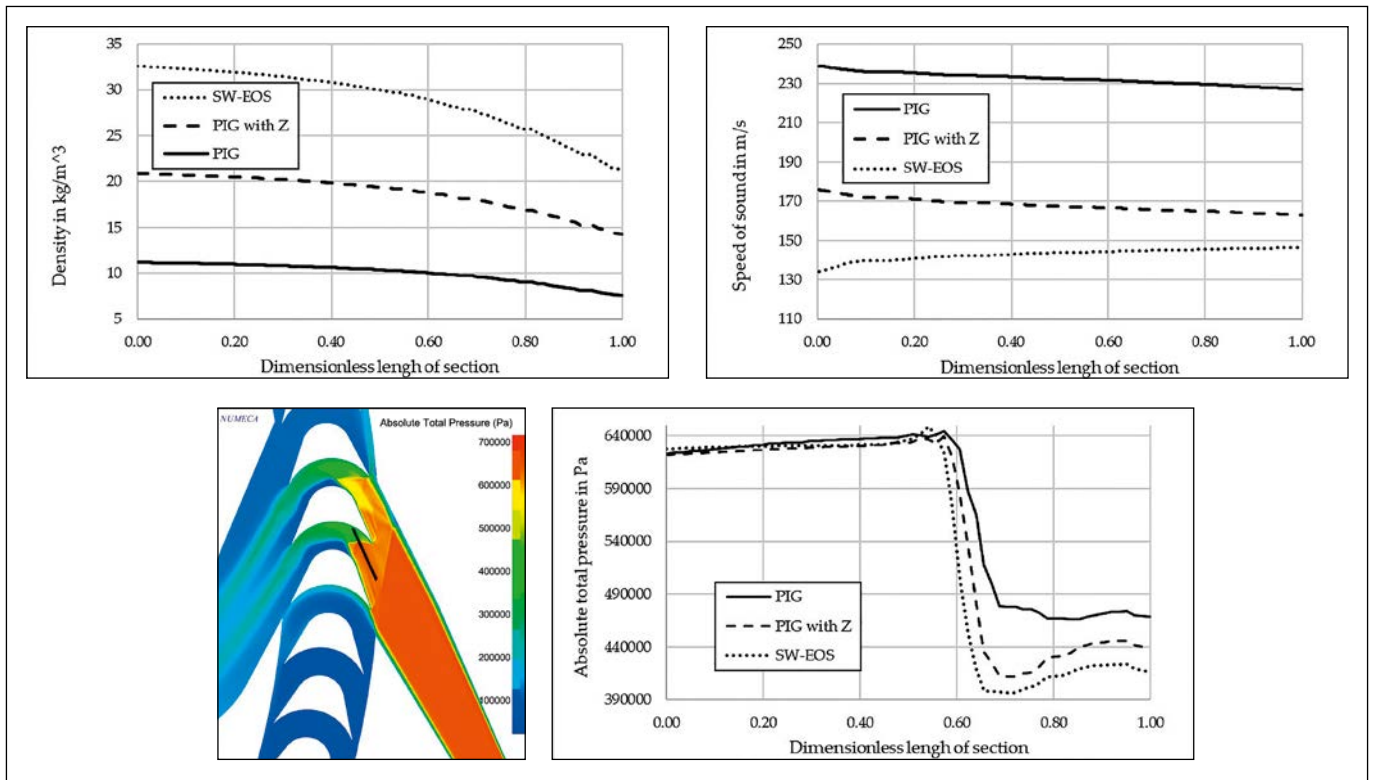


Figure 3: Comparison of the density, speed of sound along the critical nozzle area (top) and the total pressure in the rotor blade channel (bottom)

differences decrease towards the critical cross-section as compressibility approaches unity but remain much larger than expected from the compressibility values alone – PIG predicts only  $\approx 30\%$  of the SW-EOS density, and PIG+Z about  $60\%$ . To explain this, Figure 3 (top right) illustrates the speed of sound across the nozzle. At the critical nozzle area (dimensionless length = 0), PIG predicts  $\approx 240$  m/s, PIG+Z  $\approx 175$  m/s, and SW-EOS  $\approx 135$  m/s. The diverging speed of sound imply different flow velocities at the critical section, directly causing the density and mass-flow discrepancies between models. Figure 3 (bottom left and right) present the total pressure distribution across a blade-channel shock (bottom right) and the focused position (bottom left, black line). All models capture the shock position, but PIG shows it much weaker and with a different post-shock profile. PIG+Z matches the SW-EOS almost exactly, though the SW-EOS indicates a slightly stronger pressure loss. Interestingly, despite the weaker shocks, both simplified models yield lower expansion efficiencies than the SW-EOS.

## 5 Conclusion

The comparison shows that simpler fluid models did not yield the expected reduction in simulation time, since SW-EOS relies on quiet fast look-up tables. While the PIG model reduced the runtime  $26.9\%$  of the SW-EOS, it introduced large errors in key flow variables. PIG+Z improved the results but remained insufficient for accurate analysis. The deviations in mass flow mainly stem from density errors at the nozzle critical area, driven by incorrect speed of sound predictions. Although PIG+Z captured shock losses reasonably well, both simplified models underestimated expansion efficiency because the nozzle flow was distorted and did not operate at its design point. Overall, neither the ideal gas model nor its extension with compressibility is accurate enough for supersonic dense-vapor turbines, where nozzle behavior dominates performance. Simpler models might be acceptable for subsonic flows, and more flexible CFD tools could allow more precise real-gas modeling.

## References:

- [1] Streit P, Weiß AP, Stümpfl D, Špale J, Anderson LB, Novotný V et al. Concept and Design of a Velocity Compounded Radial Four-Fold Re-Entry Turbine for Organic Rankine Cycle (ORC) Applications. *Energies* 2024;17(5):1185. <https://doi.org/10.3390/en17051185>.
- [2] Cadence. computational software for intelligent system design. [September 05, 2025]; Available from: [https://www.cadence.com/en\\_US/home.html](https://www.cadence.com/en_US/home.html).
- [3] NIST REFPROP. [April 10, 2024]; Available from: <https://www.nist.gov/srd/refprop>.
- [4] CoolProp; Available from: <https://coolprop.org/>.
- [5] Tosto F, Lettieri C, Pini M, Colonna P. Dense-vapor effects in compressible internal flows. *Physics of Fluids* 2021;33(8). <https://doi.org/10.1063/5.0058075>.
- [6] Colonna P, Nannan NR, Guardone A, Lemmon EW. Multiparameter equations of state for selected siloxanes. *Fluid Phase Equilibria* 2006;244(2):193-211. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2006.04.015>.
- [7] NUMECA. TabGen. [April 12, 2024]; Available from: <https://www.numeca.de/module/#TabGen>.
- [8] Thiesen M. Untersuchungen über die Zustandsgleichung. *Annalen der Physik* 1885;260(3):467-92. <https://doi.org/10.1002/andp.18852600308>.
- [9] Onnes HK. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series. In: Onnes HK, Gavroglu K, Goudaroulis Y, editors. *Through Measurement to Knowledge: The Selected Papers of Heike Kamerlingh Onnes 1853-1926*. Dordrecht: Springer; 1990, p. 146-163.

## KONTAKT



**Philipp Streit, M.Eng.**

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

[ph.streit@oth-aw.de](mailto:ph.streit@oth-aw.de)



**Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß**

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

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





# SIEMENS

## Bewirb dich jetzt für eine Ausbildung oder ein Duales Studium bei Siemens in Amberg

Technik erleben –  
Zukunft entdecken:  [sieya.de](https://sieya.de)

### Transform the everyday with us

So findest du uns:

-  [siemens\\_ausbildung](https://www.instagram.com/siemens_ausbildung)
-  [siemens\\_insights](https://www.linkedin.com/company/siemens_ausbildung)
-  [sieya.de](https://sieya.de)
-  [ausbildung.siemens.com](https://ausbildung.siemens.com)



# Integrierte Verwaltung und Steuerung eines automatisierten Vertikallift-Lagers mit SAP S/4 EWM

## Zusammenfassung

Im Rahmen der SAPbased Smart Factory an der OTH Amberg-Weiden (OTH AW) in Weiden wurde die Lagerverwaltung eines automatisierten Lagersystems Hänel Lean-Lift® in SAP S/4HANA integriert und die Lift-Steuerung über eine REST-API angebunden. Dazu erfolgte die Definition von Lagerplatzstrukturen und einer koordinatenbasierten Nomenklatur sowie die Entwicklung eines SAP-integrierten Dialogs zur anwenderfreundlichen Initiierung des Datentransfers. Die Lagerplatzkoordinaten werden auf Basis eines 50-mm-Rasters berechnet und über Pick-o-Light-Vario® visualisiert. Mit der erfolgreichen Pilotierung war die OTH AW der erste Anwender, der die neue REST-Schnittstelle am Lean-Lift zur Anbindung an SAP EWM in der Praxis einsetzte. Das Projekt demonstriert die praxisnahe Umsetzung spezieller Industrie-4.0-Konzepte und bietet eine wertvolle Plattform für Forschung und Lehre. Zukünftige Entwicklungen fokussieren auf die Erweiterung der Prozesse und die Anbindung weiterer Smart-Factory-Komponenten. [unter Nutzung von MS Copilot]

## Abstract

As part of the SAPbased Smart Factory at OTH Amberg-Weiden (OTH AW) in Weiden, the warehouse management of an automated Hänel Lean-Lift® storage system was integrated into SAP S/4HANA and the lift control was connected via a REST API. This involved defining storage location structures and a coordinate-based nomenclature, as well as developing an SAP-integrated dialogue for user-friendly initiation of data transfer. The storage location coordinates are calculated on the basis of a 50 mm grid and visualised via Pick-o-Light-Vario®. With the successful pilot project, OTH AW was the first user to put the new REST interface on the Lean-Lift into practice for connection to SAP EWM. The project demonstrates the practical implementation of specific Industry 4.0 concepts and provides a valuable platform for research and teaching. Future developments will focus on expanding the processes and connecting additional smart factory components. [Translated with DeepL.com]

## 1 Ausgangssituation

Mit der SAPbased Smart Factory (<https://www.oth-aw.de/sapbased-smart-factory>) entsteht an der OTH AW (Standort Weiden, Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen und Gesundheit) eine digitale Modellfabrik. Dieser Laborverbund besteht aus drei Laboren mit insgesamt ca. 260 m<sup>2</sup> zu den Schwerpunkten Fertigungstechnik, Montage und Intralogistik. Das Konzept verfolgt folgende Ansätze:

- realitätsnahe Abbildung mehrstufiger betrieblicher Prozesse über die gesamte Wertschöpfungskette (Einkauf, Wareneingang, Lagerung, Fertigung & Montage, Qualitätssicherung, Kommissionierung, Versand, ...)

- im durchgängigen Kontext der Herstellung realer Beispielprodukte
- Steuerung mittels modernster IT-Systeme: SAP® S/4HANA inkl. EWM und MES
- Integration und Technologie-Erprobung von Komponenten der modernen Industrie (CNC-Maschinen, Autonome Transportfahrzeuge, Kollaborative Leichtbauroboter, 2D/3D-Bildverarbeitung, Datenbrillen, RFID, ...)
- Schaffung einer Plattform für studentische Arbeiten und Promotionen

Im Zuge des kontinuierlichen Ausbaus mit modernstem Equipment konnte im ersten Quartal 2024 im Intralogistik-Labor das automatisierte Lagergerät

Hänel Lean-Lift® (Abbildung 1) in Betrieb genommen werden. Die OTH Amberg-Weiden ist eine von wenigen Hochschulen, die einen solchen Lean-Lift in die Lehre integriert haben [1]. Bei dem Hänel Lean-Lift handelt es sich um einen sog. Vertikallift: ein Lagersystem, bei dem die zu lagernden Materialien lose oder z.B. in Behältern auf große **Tablare** gelegt werden, die dann durch eine vertikale Hubeinrichtung und eine darauf befindliche horizontale Verschiebeeinrichtung automatisiert ein- und ausgelagert werden. Die Tablare des Lean-Lift an der OTH AW haben folgende nutzbaren lichten Abmessungen: Breite 2.460 mm und Tiefe 635 mm [1]. Somit sind sechs Standard-Lagerbehälter 600 x 400 mm nebeneinander lagerbar.

Für eine Ein- oder Auslagerung werden die Tablare zur Bedienungsöffnung bewegt und dort markiert ein oberhalb der Entnahmeöffnung angebrachtes und in zwei Achsen bewegliches LED-Leuchtfeld (Hänel Pick-o-Light-Vario®) den angeforderten Artikel durch einen deutlich sichtbaren farbigen Leuchtpunkt.



Abbildung 1: Hänel Lean-Lift im Labor der OTH Amberg-Weiden

## 2 Beschreibung des F&E-Projektes

### 2.1 Zielsetzung und Teilaufgaben

Der Betrieb dieses Vertikallifts ist grundsätzlich autark in der Betriebsart „Stand Alone“ möglich. Dabei sind auch Funktionen zur Verwaltung von Artikeln, Lagerplätzen, Lagermengen etc. verfügbar. Die Bedienung zur Ein-/Auslagerung erfolgt über ein Terminal mit Touch-Display und anschaulicher Visualisierung der Lagerfunktionen. Gemäß dem Kernansatz der SAPbased Smart Factory war es aber **Zielsetzung**, den Lean-Lift an das an der OTH AW

verfügbare ERP-System SAP S/4HANA anzubinden, um die Bestandsverwaltung und Ein-/Auslagersteuerung über das Modul Extended Warehouse Management (EWM) als zentrales übergeordnetes System abzubilden.

Dazu war zunächst ein Konzept zu entwickeln, wie die Tablare mit den einzelnen Lagerbehältern als lagertechnische Organisationselemente in **SAP EWM** abgebildet werden sollen. Kernfrage: Ist das ganze Tablar ein Lagerplatz oder jeder Behälter oder ... ? Zudem musste festgelegt werden, wie im EWM die erforderlichen Daten für den Transfer zum Lean-Lift bereitgestellt werden können.

Bezüglich der technischen Anbindung des Lean-Lifts an SAP S/4HANA hatte bereits in der Phase der Beschaffung dieses Vertikallifts die projektbezogene Marktrecherche ergeben, dass eine **REST-API** als zukunftssträchtige Lösung im Umfeld von Industrie 4.0 zu bevorzugen ist. Eine REST-API ist eine Anwendungsprogrammierschnittstelle (API), die den Designprinzipien des REST-Architekturstils (Representational State Transfer) entspricht [2]. Unter anderem aufgrund der Nachfrage seitens der OTH AW fiel im Hause Hänel im Jahr 2023 die Entscheidung, diese API als neue Alternative auch für ihre automatisierten Lagergeräte zu entwickeln. REST ist z. B. im Vergleich zu einer SOAP-API (Simple Object Access Protocol) in vielen Fällen die schlankere und flexiblere Lösung, mit weniger Aufwand zu implementieren und durch weniger Overhead schneller [1]. Das Gerät im Labor der SAPbased Smart Factory war dann eines der ersten, auf dem Ende Mai 2024 das neue Software-Release mit der REST-API installiert wurde [1].

Damit ergaben sich folgende **Kernanforderungen** für das Projekt:

- Abbildung u. Verwaltung des Lean-Lifts in SAP EWM bei flexibler Belegung der Tablare mit unterschiedlich großen Behältern
- Erzeugung & Verwaltung der Lageraufgaben im SAP EWM
- Kommunikation mit Hänel-Steuerung über REST-API
- Anzeige Ein-/Auslager-Lagerplatz durch Pick-o-Light-Vario

### 2.2 Organisatorische Integration in SAP EWM

Wesentliche lagerlogistische Organisationselemente in SAP EWM sind (aufbauend auf [3]):

- Lagernummer (oberste Organisationsebene im EWM, entspricht einem physischen Lagerkomplex)
- Lagertyp (Gruppe von Lagerplätzen mit ähnlichen Eigenschaften)
- Lagerbereich (optional; z. B. Schnelldreher)
- Lagerplatz (bezeichnet die genaue Stelle im Lager, an der Materialien lagern können)

Die erste entscheidende Frage in diesem Projekt war, wie für den Lagertyp Vertikallift die **Lagerplätze** definiert werden. Dazu wurden verschiedene öffentlich zugängliche Quellen (z.B. [4],[5]) ausgewertet, aber auch Gespräche mit verschiedenen Unternehmen geführt (Firmennamen werden in diesem Bericht aus Vertraulichkeitsgründen nicht genannt). Dabei wurden mehrere grundsätzliche Alternativen identifiziert, z. B.:

- (1) jedes Tablar hat individuell eine fixe Anordnung unterschiedlich großer Lagerplätze, verschiedene Tablare können verschiedene Anordnungen aufweisen; Behälter bzw. das abgeteilte Fach im Behälter ist „Lagerplatz“
- (2) jedes Tablar ist ein Lagerplatz und wird mit einem Raster unterteilt, Behälter auf Tablar erhalten Positionen mit Bezug zu dem Raster

Nach Abschätzung von Umsetzungsaufwand im Vergleich zum Nutzenpotenzial wurde für eine erste grundsätzliche Konzeption und Umsetzung die Variante (1) ausgewählt.

Weiterhin wurden die projektspezifischen **Behältertypen** definiert:

- unterschiedliche Behälterhöhen pro Tablar unsinnig, weil Verschwendung von Lagervolumen
- ident. Höhe aller Behälter erhöht Flexibilität bzgl. Mix-Belegung je Tablar
- Höhe 170 mm ist guter Kompromiss bei den geplanten eher kleinen zu lagernden Teilen
- Basis-Beschaffung von drei verschiedenen modularen Behältergrößen, aber das Konzept zur Lagerplatz-Rasterung soll Option für Einsatz noch kleinerer Behälter bzw. Einsatzkästen erhalten

Folglich wurden drei Typen Eurostapelbehälter ausgewählt: 600 x 400, 400 x 300 und 300 x 200 mm in Höhe 170 mm. Optional sollte das zu definierende Raster aber auch noch kleinere Behälter (oder Einsatzkästen) der Abmessungen 200 x 150 x H 170 mm abbilden können (Abbildung 2).

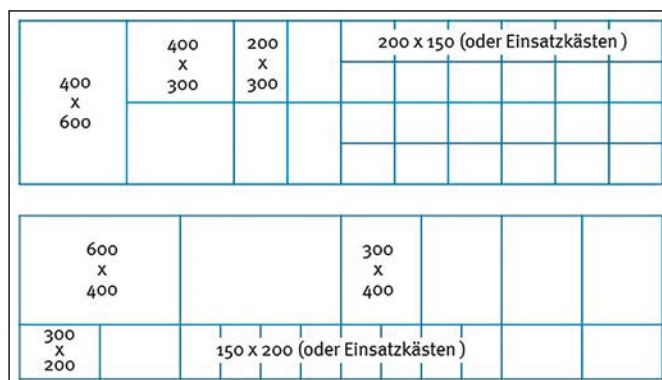


Abbildung 2: Beispielraster Behälter auf Tablar

Im nächsten Schritt war eine **Lagerplatz-Nomenklatur** zu definieren (vgl. Abbildungen 3 und 4), wobei die Möglichkeiten in SAP EWM (max. 18 Zeichen, auch Sonderzeichen möglich, ...; vgl. [3]) ausgenutzt wurden:

- Zur besseren Verständlichkeit für das Bedienpersonal wurden zwei Koordinaten getrennt abgebildet (Breite, Tiefe), gemäß der Bewegungsreihenfolge des Bedienpersonals zuerst die Breiten-Koordinate.
- Um für die geforderten Behältergrößen sowohl in Längs- als auch in Querausrichtung exakte Positionen angeben zu können, war in beide Dimensionen ein 50 mm-Raster erforderlich. Damit ergaben sich die Breiten-Koordinaten 01 bis 48 von links nach rechts und die Tiefen-Koordinaten 01 bis 12 von vorne nach hinten.
- Um die Eindeutigkeit einer Lagerplatz-Bezeichnung innerhalb einer Lagernummer sicherzustellen, wird der Lagertyp (039H) an den Beginn der Lagerplatz-Bezeichnung gesetzt.
- Für eine leichte Unterscheidung bzw. Zuordnung durch das Bedienpersonal wird die Tablarnummer (2-stellig) zusätzlich mit „T“ gekennzeichnet und eine „sprechende“ Abtrennung der Koordinaten mit „>“ (Breite von links nach rechts) und „^“ (Tiefe von vorne nach hinten) ergänzt.

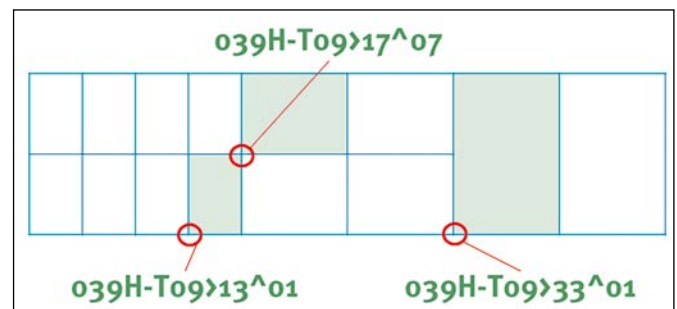


Abbildung 3: Nomenklatur Lagerplätze (Beispiele)



Abbildung 4: Muster-Tablar mit Lagerbehältern

### 2.3 Datenaufbereitung in SAP EWM für Transfer zum Vertikallift

In diesem Bericht wird die Pilot-Prozesskette zur Einlagerung von Lagerware auf einen Lagerplatz im Lean-Lift beschrieben. Ausgangspunkt im ERP-System ist eine Bestellung von Ware bei einem Lieferanten. Für die zu dieser Bestellung erzeugte Anlieferung wird nach Ankunft

und Kontrolle der Ware zunächst am WE-Arbeitsplatz im EWM der Wareneingang gebucht. Anschließend wird über die Transaktion /SCWM/PRDI eine **Lageraufgabe** angelegt inkl. Auswahl eines passenden Lagerplatzes. Zur begleitenden Identifikation der Lagerware im Materialfluss wird ein sog. Lagerauftragseinzelbeleg gedruckt (inkl. Nummer der Lageraufgabe als Barcode).

Nachdem die Ware zum Lean-Lift transportiert wurde, wird dort in einem **selbstprogrammierten SAP-Dialog** (Dynpro) die Lageraufgabe vom Begleitbeleg gescannt. Im Hintergrund werden durch das erstellte Programm (Z-Entwicklung) Daten zu dem Lagerauftrag aus der HANA-Datenbank selektiert: Produkt, Menge, Nachlagerplatz (aus Tabelle /SCWM/ORDIM\_O). Zur Berechnung der **Koordinaten in mm für die Pick-o-Light-Anzeige** werden aus der Bezeichnung des Nachlagerplatzes (Beispiele siehe Abbildung 3) gemäß der definierten Nomenklatur die Tablar-Nummer und die Koordinaten extrahiert. Über die Tabelle /SCWM/LAGP kann der beim Anlegen des Lagerplatzes zugeordnete Lagerplatztyp ermittelt werden und über diesen auf die aus Flexibilitätsgründen in einer Hilfstabelle abgelegten Abmessungen des jeweiligen Lagerplatztyps zugegriffen werden. Aus diesen Informationen kann dann anhand folgender Formel die Breiten-Koordinate der Mitte des Lagerplatzes von links auf dem Tablar berechnet werden:

$$x = (LPX - 1) * 50mm + 0,5 * LPTB$$

x: Breiten-Koordinate [mm]

LPX: Breiten-Koordinate Lagerplatz

LPTB: Lagerplatztyp-Breite [mm]

Analog wird für die Berechnung der Tiefen-Koordinate verfahren.

#### 2.4 Technische Anbindung über REST-API

Die REST-Schnittstelle des Lean-Lifts kann sowohl über http als auch über https aufgerufen werden. Da https sicherer und dadurch zukunftsfähiger ist, wurde dieses Protokoll für die Kommunikation zwischen dem Vertikallift an der OTH AW in Weiden und dem SAP-Server am University Competence Center (UCC) in München gewählt. Nach den netzwerktechnischen Freigaben an beiden Standorten konnten die notwendigen Zertifikate erstellt und installiert werden.

Basis für die Kommunikation ist das **Internet Communication Framework (ICF)**: „... eine auf Interfaces und Klassen basierende Programmierschnittstelle (API) für die Kommunikation von ABAP-Programmen mit dem Internet. Das ICF unterstützt die Internet-Protokolle HTTP, HTTPS und SMTP.“ [6]. Unter Einsatz des SAP ICF konnte ein auf SAP-Standards aufbauendes Softwarekonzept erarbeitet werden. Dies ist für eine langfristige Einsatzbereitschaft und Wartbarkeit – auch über Releasewechsel hinaus – notwendig. Dennoch besteht dadurch die Möglichkeit durch ABAP-Eigenentwicklungen die Daten, Logiken und Abläufe aus SAP EWM mit der Liftsteuerung möglichst standardisiert aber so flexibel wie nötig zu koppeln.

Im pilotierten Prozessablauf startet das SAP-System die Kommunikation zum Lean-Lift mit Angabe der vorab ermittelten Tablarnummer und Lagerplatzkoordinaten. Nachdem das Tablar erfolgreich an der Ausgabeöffnung (inkl. Ansteuerung Pick-o-Light-Vario) zur Einlagerung der Ware bereitgestellt wurde, wird die Erfolgsmeldung als Status an das SAP-System zurückgemeldet. Die Quittierung der Lageraufgabe im SAP erfolgt programmgesteuert automatisch über den Funktionsbaustein /SCWM/TO\_CONFIRM. Ein Fehlerfallhandling wird durch einen abweichenden Status im SAP ausgelöst.

### 3 Ergebnisstand und Ausblick

Die Integration der Lagerverwaltung des Hänel Lean-Lifts in SAP EWM und die Ansteuerung des Lifts aus SAP EWM über die REST-Anbindung konnte konzipiert und erfolgreich pilotiert werden. Die OTH Amberg-Weiden ist damit der erste Kunde von Hänel, der diese zukunftssträchtige Anbindung realisieren konnte [1]. Aufgrund der Marktvorbereitung von SAP und Hänel Lean-Liften weist diese Entwicklungsarbeit sicherlich eine hohe Praxisrelevanz auf. Auch für die Studierenden an der OTH AW in Weiden steht damit ein reales Beispiel für diese moderne Kommunikationstechnologie zur Verfügung.

Für die Zukunft sind weitere Optimierungen im Detail (z. B. Zugriff auf SAP mittels Web-GUI direkt auf dem Hänel-Terminal) sowie die Ausweitung auf weitere Prozessketten im Fokus. Außerdem kann auf Basis des gewonnenen Know-hows versucht werden, auch weitere Komponenten einer Smart Factory an SAP anzubinden (z. B. Autonome Transportfahrzeuge).

---

## Referenzen:

- [1] Informationen der Hänel GmbH & Co. KG, 2023-2025.
- [2] <https://www.ibm.com/de-de/topics/rest-apis> (abgerufen am 17.05.2024)
- [3] Lange, Jörg et al.: Warehouse Management mit SAP EWM. 2., aktualisierte und erw. Aufl., Bonn: Galileo Press, 2013.
- [4] <https://www.ssi-schaefer.com/de-de/produkte/lagerung/dynamische-lagerung/lagerlift-ssi-logimat/direkt-aus-sap-steuern>
- [5] [https://www.youtube.com/watch?v=\\_B5YE\\_UDxUM](https://www.youtube.com/watch?v=_B5YE_UDxUM) (abgerufen am 28.03.2024)
- [6] [https://help.sap.com/doc/abapdocu\\_750\\_index\\_htm/7.50/de-de/abenicf.htm](https://help.sap.com/doc/abapdocu_750_index_htm/7.50/de-de/abenicf.htm) (abgerufen am 10.06.2024)

## KONTAKT



**Christoph Hammer, M.A.**

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



**Annika Stahl, M.Sc.**

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



**Prof. Dr.-Ing. Günter Kummetssteiner**

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

[g.kummetssteiner@oth-aw.de](mailto:g.kummetssteiner@oth-aw.de)

# Entwicklung und Test eines multimodalen Steuerungssystems (Gesten und Sprache) für eine automatisierte Verladebrücke

## Zusammenfassung

Automatisierte Verladebrücken erfordern eine präzise Positionierung des Greifers, die durch die Schwingungsneigung des Systems erschwert wird. Als Alternative zu herkömmlichen Joysticks wird in dieser Arbeit ein multimodales, berührungsloses Steuerungskonzept vorgestellt, das Gesten- und Spracherkennung auf einem Raspberry Pi 4B kombiniert. Zur Interaktion dienen kurze englische Sprachbefehle sowie leicht zu erlernende Gesten der rechten Hand.

Die Gestenerkennung basiert auf dem MediaPipe-Handtracking, das die dreidimensionalen Landmarken der Hand erfasst und in ein leichtgewichtiges neuronales Netz einspeist, welches die Gesten klassifiziert. Die Sprachsteuerung wandelt eingehende Audiosignale in Spektrogramme um, die anschließend durch ein Convolutional Neural Network ausgewertet werden.

Mit beiden Erkennungsverfahren lassen sich horizontale und vertikale Bewegungen des Greifers steuern sowie die Schwingungsregelung ein- und ausschalten. Die Implementierung wurde unter praxisnahen Bedingungen getestet und zeigte eine robuste Erkennung auch bei variierenden Licht- und Geräuschverhältnissen. Dieses Konzept eröffnet Perspektiven für intuitivere und ergonomischere Steuerungen in industriellen Anwendungen.

## Abstract

Automated container cranes require precise positioning of the spreader, which is often hindered by the system's tendency to oscillate. This work presents a multimodal, contactless control approach combining gesture and speech recognition, implemented on a Raspberry Pi 4B as an alternative to conventional joystick-based systems. Short English voice commands and easy-to-learn right-hand gestures are used for interaction.

The gesture recognition is based on MediaPipe hand tracking, which detects three-dimensional hand landmarks and processes them through a lightweight neural network for classification. Speech recognition is performed by converting incoming audio signals into spectrograms, which are then evaluated by a convolutional neural network.

Both recognition systems enable horizontal and vertical movements of the spreader, as well as activation and deactivation of the oscillation control. The implementation was tested under realistic conditions and demonstrated robust performance in varying lighting and noise environments. This concept offers potential for more intuitive and ergonomic control interfaces in industrial applications.

## 1 Einleitung

Verladebrücken sind typische mechatronische Systeme, wie sie beispielsweise in Hafenanlagen zum Be- und Entladen von Containerschiffen eingesetzt werden. Die manuelle Positionierung des Greifers stellt dabei eine besondere Herausforderung dar, da es sich um ein

schwach gedämpftes, schwingungsfähiges System handelt, das durch Verfahrenbewegungen entlang der Horizontalachse zu Schwingungen angeregt wird.

Bisher erfolgte die Steuerung mithilfe eines Joysticks, der eine nahezu stufenlose Einstellung der Horizontalgeschwindigkeit erlaubt, während die Vertikalachse mit

konstanter Geschwindigkeit auf- und abbewegt wird. Zusätzlich kann über einen Taster der Regelalgorithmus ein- und ausgeschaltet werden [1].

Da mechanische Eingabegeräte mit Schleifkontakten und beweglichen Teilen potenziell verschleißanfällig sind, eröffnen leistungsfähige Verfahren des maschinellen Lernens neue Möglichkeiten, haptische Steuerungen durch berührungslose Ansätze zu ersetzen. So versprechen unter anderem Systeme auf Basis von Gesten- oder Sprachsteuerung eine robuste und wartungsarme Interaktion mit dem zu steuernden System.

In diesem Beitrag wird ein innovatives Steuerungssystem zur berührungslosen Bedienung einer Verladebrücke vorgestellt. Die Verarbeitung von Gesten- und Sprachkommandos erfolgt auf Basis moderner Verfahren der künstlichen Intelligenz und wird unter praxisnahen Bedingungen erprobt.

## 2 Aufbau und Struktur der Verladebrücke

Im Rahmen mehrerer Projekt- und Abschlussarbeiten wurde ein funktionsfähiges Modell einer Verladebrücke entwickelt und aufgebaut. Primäres Ziel war es, eine reale Versuchsplattform zur Entwicklung und Erprobung von Regelungsstrukturen zur Dämpfung der Greiferschwingungen zu schaffen [1].

Das System besteht im Wesentlichen aus einem Linearantrieb, der durch Lineargleitlager geführt wird. Dieser setzt sich aus einem beweglichen Primärteil und feststehenden Permanentmagneten zusammen. Zur Regelung des Synchron-Linearmotors wird ein Umrichter der Baureihe CDE der Firma LTI eingesetzt. Die Erfassung der Absolutposition erfolgt mithilfe eines Magnetbands. Der Antrieb wird im geschwindigkeitsgeregelten Modus betrieben und verfügt über programmierbare Endpositionen.

Das in die Horizontalachse integrierte Hubwerk zum Heben und Senken von Lasten ist als Seilwinde auf Basis eines Stahlzylinders ausgeführt. Angetrieben wird es von einem permanenten Gleichstrommotor, der über ein Getriebe mit dem Zylinder gekoppelt ist (vgl. Abbildung 1b).

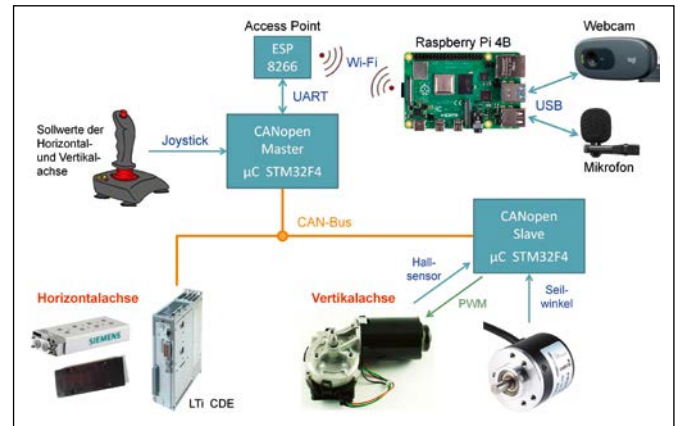


Abbildung 2: System- und Kommunikationsstruktur

Die Automatisierung der Verladebrücke erfolgt mithilfe von zwei Mikrocontrollern des Typs STM32F407, die per CAN-Bus untereinander sowie mit dem Umrichter LTI CDE verbunden sind. Die Kommunikation zwischen den drei Busteilnehmern basiert auf dem CANopen-Protokoll (siehe Abbildung 2) [2, 3, 4].

Der erste der beiden Mikrocontroller übernimmt die Rolle des CANopen-Masters. Er bildet die zentrale Recheneinheit des Systems, in der alle relevanten Informationen zusammenlaufen – darunter auch die Auswertung der Steuersignale des Bedieners. Zusätzlich läuft auf dem Rechner auch die Regelung zur Schwingungsdämpfung des Greifers. Abhängig von den Verfahrenshandlungen des Bedieners werden Steuerbefehle für beide Antriebsmotoren generiert und über den Bus übertragen.

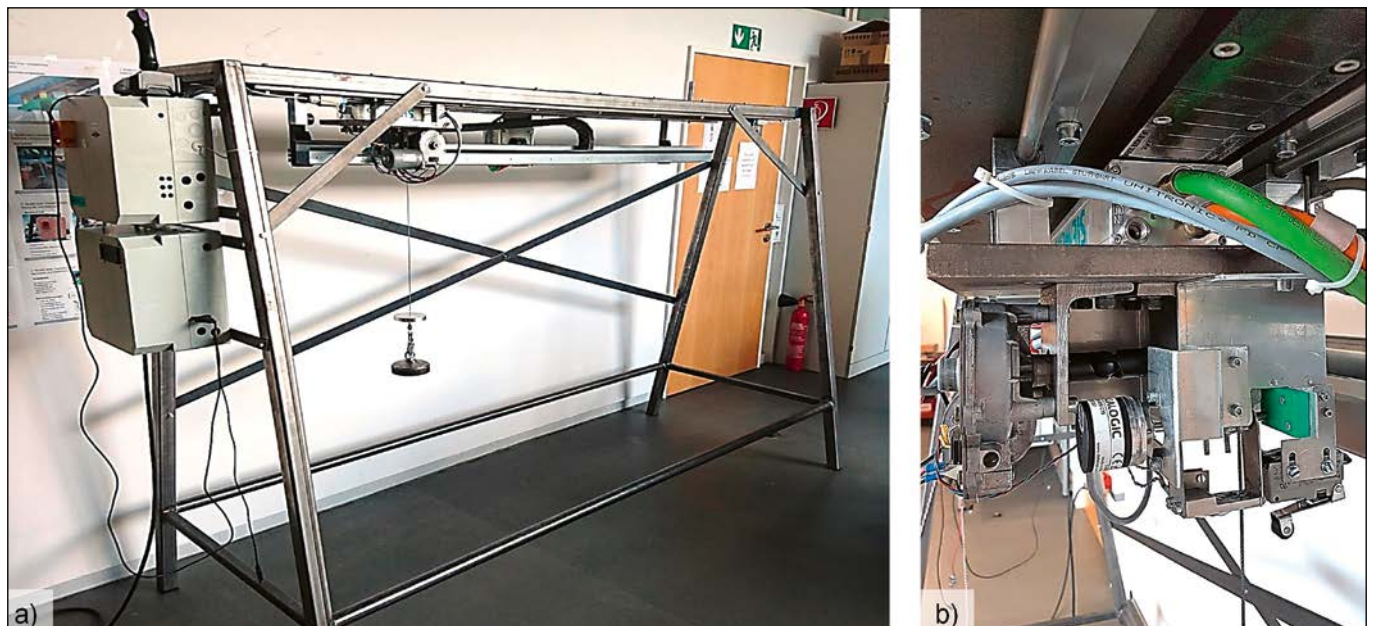


Abbildung 1: a) Gesamtansicht der Verladebrücke; b) Hubwerk mit Seilwinde und Drehwinkelgeber

Der zweite Mikrocontroller fungiert als CANopen-Slave und ist für die Ansteuerung des Motors der Vertikalachse zuständig. Darüber hinaus wertet er einen integrierten Hallsensor aus, um die abgewinkelte Seillänge zu bestimmen. Ergänzend werden die Signale eines Rechteckgebers analysiert, über den der Seilwinkel erfasst wird. Dieser dient als Grundlage für die Schwingungsregelung.

Um die Steuersignale des Bedieners auch aus anderen, digitalen Quellen an den zentralen Mikrocontroller übertragen zu können, wurde ein ESP8266 über eine UART-Schnittstelle angebunden. Dadurch lassen sich die Befehls-Informationen nun auch per WLAN übermitteln, was eine höhere Flexibilität bei der Auswahl der Eingabegeräte ermöglicht [5].

In einem ersten Entwicklungsschritt wurden die Gesten- und Sprachsignale auf einem PC verarbeitet. In späteren Phasen konnten die Verfahren so weit optimiert werden, dass sie auch auf einem Raspberry Pi 4B mit 4GB RAM lauffähig waren [6].

### 3 Steuerkommandos

Im Folgenden sollen die benötigten Steuerbefehle beschrieben werden. Da sich die Verladebrücke in zwei Dimensionen verfahren lässt, sind grundsätzlich Kommandos für die vier Bewegungsrichtungen „rechts“, „links“, „oben“ und „unten“ erforderlich.

Ein gleichzeitiges Verfahren der horizontalen und vertikalen Achse ist prinzipbedingt nicht möglich. Die Ursache liegt in der zugrunde liegenden Regelungsstruktur: Die Eigenfrequenz des Systems hängt unmittelbar von der aktuellen Seillänge ab, welche sich bei vertikalen Bewegungen verändert.

Wird die vertikale Achse freigegeben, müssen die Regler kontinuierlich an die veränderten Streckenparameter angepasst werden – gleichzeitige horizontale Bewegungen wären in diesem Zustand nicht sinnvoll. Umgekehrt wird bei Freigabe der horizontalen Achse die vertikale Bewegung gesperrt, so dass die Regelung mit konstanten Parametern arbeiten kann.

Aus diesem Grund sind zusätzlich zu den Richtungskommandos weitere Befehle notwendig, um zwischen horizontaler und vertikaler Bewegung umzuschalten. Ergänzend werden Kommandos zum Ein- und Ausschalten der Schwingungsregelung benötigt, um deren Wirkung auf die horizontale Bewegung gezielt untersuchen und demonstrieren zu können. Die Zuordnung der Steuerfunktionen zu den Gesten- und Sprachkommandos erfolgt dabei gemäß Tabelle 1.

Bei der Auswahl der Gesten lag der Fokus auf einer intuitiven Erlernbarkeit sowie auf einer symmetrischen Über-

tragbarkeit bei Richtungswechseln. Besonders wichtig war ein schneller Übergang zwischen der Aktivierung und der anschließenden Bewegung nach links oder rechts. Zudem wurde auf eine klare Unterscheidbarkeit der Gesten geachtet, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Für die Sprachkommandos war es entscheidend, schnelle Befehlswechsel zu ermöglichen. Deshalb wurden bewusst kurze, einsilbige Sprachbefehle mit einer maximalen Dauer von etwa 0,5 Sekunden gewählt. Deutsche Begriffe wie „oben“ oder „unten“ erfüllen diese Anforderung nicht, so dass auf englische Kommandos zurückgegriffen wurde, die sowohl kurz als auch eindeutig unterscheidbar sind.

Eine explizite Vorgabe der Horizontalgeschwindigkeit wie beim Joystick ist mit diesem Ansatz nicht möglich. Stattdessen wird die Geschwindigkeit nach einem Richtungsbe- fehl (links oder rechts) linear mit einer festgelegten Beschleunigung erhöht. Der Vorgang kann gestoppt werden, indem der Befehl zum Einschalten der Horizontalachse (geschlossene Faust, „on“) erneut ausgeführt wird.

Tabelle 1: Gesten- und Sprachkommandos

Funktion	Geste (rechte Hand)	Sprachkommando
Horizontalachse aktivieren, Vertikalachse deaktivieren	Geschlossene Faust	„on“
Horizontalachse deaktivieren, Vertikalachse aktivieren	Geöffnete Handfläche	„off“
Nach rechts fahren	Faust mit Daumen nach rechts	„right“
Nach links fahren	Faust mit Daumen nach links	„left“
Nach oben fahren	Daumen nach links, Zeigefinger nach oben, übrige Finger zur Faust geschlossen	„up“
Nach unten fahren	Daumen nach links, Zeigefinger nach unten, übrige Finger zur Faust geschlossen	„down“
Regelung aktivieren	Victory-Zeichen (Zeige- und Mittelfinger gespreizt)	„yes“
Regelung deaktivieren	OK-Geste (Daumen und Zeigefinger bilden Kreis, übrige Finger abgespreizt)	„no“

## 4 Gestensteuerung

Zur Erfassung der Handgesten wird eine Logitech C270 HD Webcam eingesetzt. Die Kamera liefert Videobilder in einer Auflösung von  $1280 \times 720$  Pixeln (720p) bei einer Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde und verfügt über ein Sichtfeld von etwa  $60^\circ$ . Trotz ihrer einfachen Ausstattung eignet sie sich gut für grundlegende Aufgaben der Gestenerkennung. Dank USB-Schnittstelle und Plug-and-Play-Funktionalität lässt sie sich problemlos in bestehende Systeme wie PC oder Raspberry Pi integrieren [7].

Die Implementierung der Gestenerkennung erfolgt in Python, was plattformunabhängige Entwicklung und den direkten Zugriff auf etablierte Frameworks wie TensorFlow und OpenCV ermöglicht [8, 9]. Die universelle Programmiersprache zeichnet sich durch klare Syntax und eine große Entwickler-Community aus. Selbst auf leistungsschwächeren Plattformen wie dem Raspberry Pi ist Python praxistauglich, da rechenintensive Teile der Frameworks in hochoptimiertem C/C++ umgesetzt sind und die Performance somit nicht allein von der Interpretiergeschwindigkeit abhängt. Für den Einsatz trainierter TensorFlow-Modelle auf ressourcenschwachen Geräten steht zudem TensorFlow Lite zur Verfügung, wodurch sich Modelle für den Raspberry Pi optimieren und mit deutlich reduzierter Latenz ausführen lassen [10].

Als Grundlage für das Training der Modelle wurde im Rahmen einer Projektarbeit zunächst ein Datensatz mit rund 600 Einzelbildern erstellt. Durch verschiedene Data-Augmentation-Verfahren – darunter Farbumwandlung in Graustufen, Hinzufügen von Rauschen, Weichzeichnung zur Simulation unscharfer Aufnahmen sowie geometrische Transformationen – wurde dieser auf etwa 1800 Bilder erweitert [11].

Auf Basis dieses Datensatzes wurden zunächst zwei Modellansätze zur Gestenerkennung untersucht, die auf etablierten Verfahren der Objekterkennung aufsetzen:

- FASTER R-CNN mit ResNet-50 V1 als Backbone: Eingabebilder im Format  $640 \times 640$  Pixel werden durch ein Residual Network verarbeitet, um abstrakte Merkmale (Feature Maps) zu extrahieren. Ein Region Proposal Network (RPN) schlägt potenzielle Objektbereiche vor, die nach dem RoI Pooling von einem Klassifikations- und einem Bounding-Box-Regression-Head ausgewertet werden. Das Verfahren liefert auf dem PC sehr gute Ergebnisse, ist jedoch für den Raspberry Pi 4B aufgrund des hohen Rechenaufwands ungeeignet [12].
- SSD-MobileNet V2: Dieses Modell verarbeitet  $300 \times 300$  Pixel große Eingabebilder und nutzt einen effizienten MobileNet-Backbone zur Merkmalsextraktion. Statt Regionen vorzuschlagen, platziert der Single Shot MultiBox Detector (SSD) vordefinierte Ankerboxen auf mehreren Ebenen der Feature Maps

und schätzt für jede direkt Klasse und Bounding Box. Dadurch ist das Verfahren deutlich schneller, jedoch weniger genau als das ResNet-50-basierte FASTER R-CNN. In den Tests zeigte sich, dass nicht in allen Fällen die korrekte Geste erkannt wird. Auf dem Raspberry Pi treten trotz des einfacheren Ansatzes merkliche Verzugszeiten von rund 0,5 s bis zur eindeutigen Erkennung auf [13].

Angesichts dieser Ergebnisse wurde anschließend die Hand-Tracking-Funktionalität von MediaPipe auf ihre Eignung zur Gestenerkennung untersucht. MediaPipe ist ein von Google entwickeltes Framework zur Erstellung plattformübergreifender, in Echtzeit arbeitender Verarbeitungspipelines für Audio-, Video- und Sensordaten. Es kombiniert klassische Signalverarbeitungsschritte mit speziell trainierten Machine-Learning-Modellen und ist auf Effizienz und geringe Latenz optimiert [14].

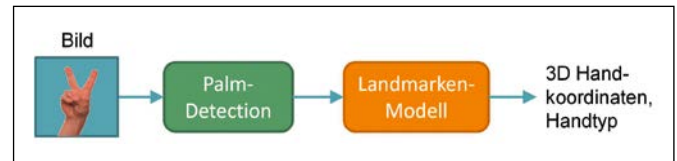


Abbildung 3: Verarbeitungsschritte im MediaPipe-Handtracking

Für die Handerkennung nutzt MediaPipe ein zweistufiges Verfahren: Zunächst wird das Eingabebild auf eine Auflösung von  $256 \times 256$  Pixel herunterskaliert. Anschließend identifiziert ein leichtgewichtiges CNN die Position einer Handfläche (Palm Detection). Der so ermittelte Bildausschnitt wird danach an ein präzises Landmarken-Modell übergeben, das 21 charakteristische Punkte der Hand (x-, y- und z-Koordinaten) berechnet. Daraus lässt sich zudem bestimmen, ob die rechte oder linke Hand vorliegt. MediaPipe kann auch mehrere Hände gleichzeitig erkennen; im vorliegenden Anwendungsfall wird jedoch aus Performancegründen nur eine Hand ausgewertet. Das System liefert als Ergebnis einen Vektor mit den Handkoordinaten sowie der Handseite, was eine direkte Weiterverarbeitung zur Gestenerkennung ermöglicht [15].

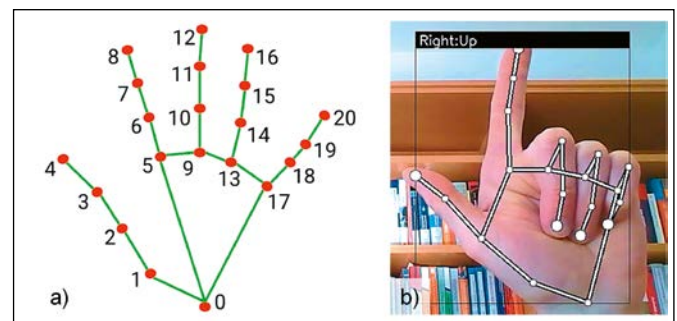


Abbildung 4: Handkoordinaten a) Punkte [16]; b) Geste „up“

Auf dieser Basis wurden für die in Tabelle 1 definierten acht Gesten insgesamt mehr als 400 Handkoordinaten-Datensätze erfasst und für das Training eines leichtgewichtigen, vollständig verbundenen neuronalen Netzes

(Multi-Layer Perceptron, MLP) zur Klassifikation verwendet. Als Eingabe dienen die von MediaPipe ermittelten x- und y- Werte der 21 Handkoordinaten, die zu einem Vektor der Länge 42 ( $21 \times 2$ ) zusammengefasst werden. Das Modell umfasst mehrere vollständig verbundene Schichten (sogenannte Dense-Layer) mit ReLU-Aktivierungsfunktionen, ergänzt durch Dropout-Schichten zur Reduzierung von Überanpassung. Die Ausgabeschicht ist eine Softmax-Schicht mit einer Neuronenzahl entsprechend der Anzahl der zu erkennenden Gestenklassen. Für das Training wird der Adam-Optimierer in Kombination mit der bei Klassifikatoren üblichen Verlustfunktion „Sparse Categorical Crossentropy“ eingesetzt.

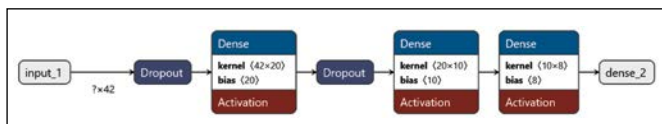


Abbildung 5: Struktur des MLP-Klassifikationsnetzwerks

Durch den kompakten Aufbau und die geringe Eingabegröße lässt sich das Modell auch auf leistungsschwächeren Plattformen wie dem Raspberry Pi effizient ausführen und ermöglicht dort eine schnelle Inferenz bei geringen Latenzzeiten. Der Ansatz ist zudem leicht erweiterbar: Sollten weitere Gesten hinzukommen, muss lediglich ein neues Klassifikationsmodell trainiert werden, während die übrige Erkennungs- und Vorverarbeitungsstruktur unverändert bleiben kann.

Die auf dem Handtracking von MediaPipe basierende Gestenerkennung zeigte sich im Praxistest robust und zuverlässig. Sie arbeitet stabil unter wechselnden Lichtverhältnissen und bei unterschiedlichen Hintergründen. Zur Erhöhung der Erkennungszuverlässigkeit werden in der implementierten Steuerung ausschließlich Gesten der rechten Hand akzeptiert. Selbst bei verschiedenen Nutzern erfolgt die Erkennung der definierten Gesten in der Regel konsistent und präzise.

## 5 Sprachsteuerung

Falls die Gestensteuerung im Praxiseinsatz nicht genutzt werden kann – etwa, weil die rechte Hand für andere Arbeiten benötigt wird – bietet die Sprachsteuerung eine interessante Alternative. Hierfür wird das Eingangsaudiosignal zunächst in ein „Bild“ in Form eines Spektrogramms umgewandelt und anschließend mit einem Convolutional Neural Network (CNN) klassifiziert [17, 18]. Als Audioeingabegerät dient ein Gyvazla USB-Mikrofon, ein kompaktes Kondensatormodell mit omnidirektionaler Charakteristik. Es wird direkt per USB mit dem Raspberry Pi verbunden, benötigt keine zusätzlichen Treiber und deckt mit einem Frequenzbereich von etwa 50 Hz bis 16 kHz klare Sprachaufnahmen bei geringem Eigenrauschen ab. Das Mikrofon bildet somit eine solide Grundlage für die Erkennung von Sprachkommandos [19].

Die Datenerfassung erfolgt in 0,5 s langen Monoaufnahmen bei einer Abtastrate von 16 kHz, was 8000 Abtastwerten entspricht. Das Audiosignal wird dabei auf den Wertebereich zwischen  $-1 \dots 1$  normiert. Um Rechenressourcen zu sparen, beginnen Aufnahme und Verarbeitung erst dann, wenn der Signalpegel den Wert 0,05 überschreitet.

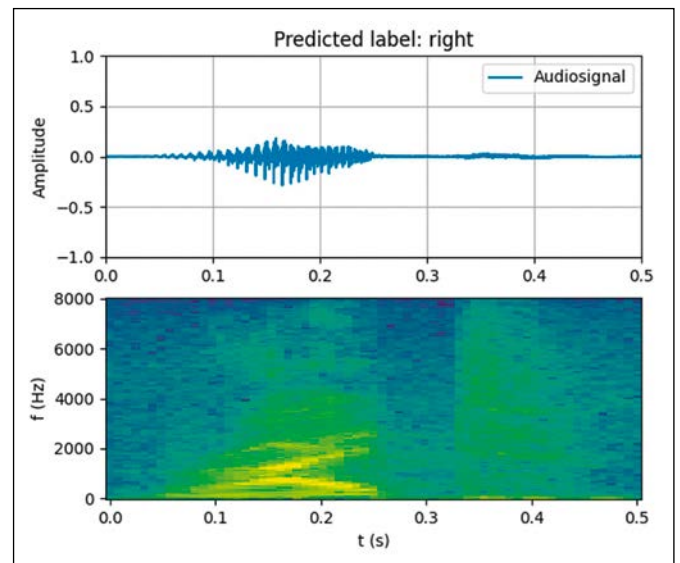


Abbildung 6: Zeitsignal mit zugehörigem Spektrogramm

Zur Vorverarbeitung wird das Audiosignal per Kurzzeit-spektralanalyse zunächst in ein zweidimensionales Spektrogramm überführt. Dazu erfolgt eine Aufteilung der 8000 Abtastwerte in Segmente zu 256 Samples mit 50 % Überlappung. Jedes Segment wird unter Anwendung einer Hann-Fensterung mittels FFT in das Betragsspektrum umgerechnet. Aufgrund der Symmetrie der FFT entstehen so 129 unabhängige Spektralwerte pro Segment. Über alle 63 Segmente ergibt sich schließlich ein Spektrogramm der Größe  $63 \times 129$ , das als Eingabematrix in das Klassifikationsmodell eingeht [20].

Das folgende CNN zur Merkmalsextraktion besteht aus drei Faltungsschichten mit  $3 \times 3$  Filterkernen und einer steigenden Filteranzahl von 4, 8 und 16. Jede Faltungsschicht wird durch ein  $2 \times 2$ -Max-Pooling ergänzt. Für die anschließende Klassifikation kommen zwei Dense-Layer zum Einsatz: der erste mit 32 Neuronen und ReLU-Aktivierung, der zweite als Softmax-Ausgabeschicht mit neun Klassen. Um Alltagsgespräche und Umgebungsgeräusche von tatsächlichen Steuerbefehlen zu unterscheiden, wird neben den acht Sprachkommandos aus Tabelle 1 zusätzlich die Klasse „unknown“ berücksichtigt.

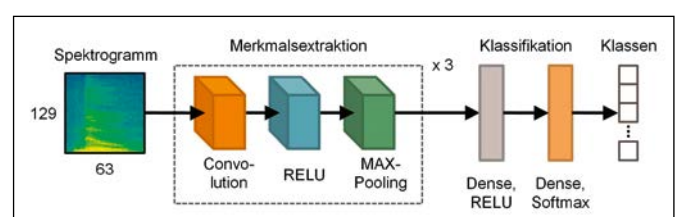


Abbildung 7: Struktur des CNN zur Merkmalsextraktion und Klassifikation

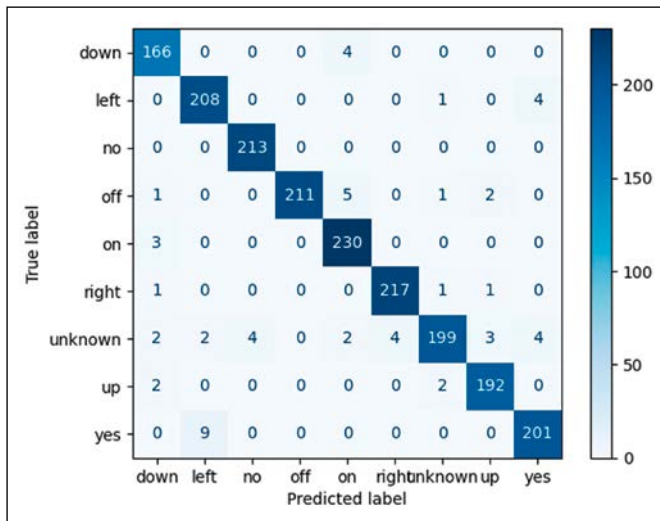


Abbildung 8: Verwechslungsmatrix für den Testdatensatz

Für das Training wurden pro Klasse rund 200 Audiosequenzen aufgenommen. Mithilfe von Data Augmentation – durch Rauschüberlagerung, Lautstärkevariation, Zeitstreckung und Tonhöhenänderung – konnte der Datensatz auf etwa 9500 Aufnahmen erweitert werden. Die abschließende Evaluierung mit einem separaten Testdatensatz (20 % des Gesamtbestands) bestätigte die hohe Erkennungsgüte, so dass die Verwechslungsmatrix nur wenige Fehlklassifikationen aufweist (Abbildung 8).

Dank des leichtgewichtigen Modells erfolgt die Klassifikation auf dem eingesetzten Raspberry Pi 4B mit kurzer Latenz. Durch die Auslagerung der Sprachverarbeitung auf einen separaten Kern des Quad-Core-Prozessors wird eine zügige und störungsfreie Ausführung gewährleistet. Die Trainingsdaten stammen von zwei unterschiedlichen Sprechern, was zu einer sehr zuverlässigen Erkennung bei diesen Personen führt. Bei der Generalisierung auf andere Sprecher sind Fehlklassifikationen jedoch nicht auszuschließen, da Stimmvariationen und individuelle Aussprachegewohnheiten im bisherigen Trainingsdatensatz nur begrenzt berücksichtigt sind. Um die Zuverlässigkeit der Befehls-erkennung zu erhöhen, akzeptiert die Implementierung ein Sprachkommando nur dann, wenn die Vorhersagewahrscheinlichkeit mindestens 95 % beträgt. Dadurch konnten Fehlaktivierungen durch Hintergrundgeräusche oder zufällige Gesprächsfetzen deutlich reduziert werden.

## 6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnte erfolgreich demonstriert werden, dass sich auf einem Raspberry Pi 4B eine Gesten- sowie eine Spracherkennung parallel rechnen lassen. Beide Erkennungsverfahren wurden selbstständig implementiert, trainiert und am realen Teststand erprobt. Um eine eindeutige Steuerungsentcheidung sicherzustellen, wurde zudem festgelegt, dass bei zeitgleichem Eintreffen eines Gesten- und Sprachbefehls der Gestenerkennung Vorrang eingeräumt wird.

Das System dient künftig als Demonstrator bei verschiedenen Veranstaltungen und Vorlesungen. Darüber hinaus bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Weiterentwicklung:

- Verbesserung der Erkennungsgenauigkeit durch den Einsatz neuartiger Verfahren des maschinellen Lernens.
- Erweiterung des Audio-Trainingsdatensatzes um eine größere Vielfalt an Sprechern zur Verbesserung der Generalisierungsgüte.
- Integration zusätzlicher Modalitäten, wie z. B. Blickverfolgung oder Körperposenerkennung, um das System noch flexibler einsetzbar zu machen.

Die entwickelte Lösung zeigt, dass moderne, multimodale Steuerungssysteme auch auf ressourcenbegrenzter Hardware zuverlässig realisierbar sind – und bietet eine robuste, flexibel erweiterbare Basis für zukünftige Anwendungen.

## Referenzen:

- [1] Wolfram A.; Stich, J. (2017): Entwicklung, Aufbau und Regelung einer Verladebrücke, Forschungsbericht 2017, OTH Amberg-Weiden, S 124-129
- [2] ST (2025): STM32F407/417, Overview, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407-417.html> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [3] CAN Bus (2025): <https://www.can-cia.org/can-knowledge> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [4] CANopen (2025): <https://www.can-cia.org/can-knowledge/canopen> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [5] Espressif (2023): ESP8266EX, Datasheet, [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/oa-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/oa-esp8266ex_datasheet_en.pdf) [abgerufen am: 10.08.2025]
- [6] Raspberry Pi 4B (2025): <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> [abgerufen am: 10.08.2025]

- [7] Logitech C270 HD Webcam (2025): <https://support.logi.com/hc/de/articles/360023393913-Technische-Daten-der-Logitech-HD-Webcam-C270> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [8] OpenCV (2025): <https://opencv.org/> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [9] Tensorflow (2025): <https://www.tensorflow.org/> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [10] Tensorflow Lite (2025): <https://www.tensorflow.org/lite> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [11] Shorten, C.; Khoshgoftaar, T. M. (2019). "A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning". *Journal of Big Data*. 6 (1): 60. doi: 10.1186/s40537-019-0197-0
- [12] Ren, S.; He, K.; Girshick, R.; Sun, J. (2017): Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39, S. 1137-1149.
- [13] Sandler, M., Howard, A.; Zhu, M.; Zhmoginov, A.; Chen, L.-C. (2018): MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, S. 4510-4520.
- [14] Mediapipe (2025): <https://developers.google.com/mediapipe> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [15] Zhang, F.; Bazarevsky, V.; Vakunov, A.; Tkachenka, A.; Sung, G.; Chang, C.-L.; Grundmann, M. (2020): MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking, *CVPR Workshop on Computer Vision for Augmented and Virtual Reality*, Seattle, USA.
- [16] MediaPipe (2025): Anleitung zur Erkennung von Handmarken, [https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/hand\\_landmarker?hl=de](https://ai.google.dev/edge/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker?hl=de) [abgerufen am: 10.08.2025]
- [17] Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25, 1097–1105.
- [18] Gouda, S. K.; Kanetkar, S.; Harrison, D.; Warmuth, M. K.; (2020): Speech Recognition: Keyword Spotting Through Image Recognition, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.03759>
- [19] Gyvazla USB-Mikrofon (2025): <https://www.amazon.de/Seacue-Omnidirektionaler-Kondensator-Interviews-Netzwerksingen/dp/B071171DBP> [abgerufen am: 10.08.2025]
- [20] Werner, M. (2019): *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB®, Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen*, 6. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden.

## KONTAKT



**Prof. Dr.-Ing. Armin Wolfram**

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

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

## Vorlesungsbegleitende Förderung der Ableitungs- und Integrationsfertigkeiten von Studierenden durch einen digitalen Selbstlernbaustein – Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Abschlusstest und Klausurleistung in einer Mathematikvorlesung an der OTH Amberg-Weiden

### Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wird der Zusammenhang zwischen dem Absolvieren eines digitalen Selbstlernbausteins zur Differential- und Integralrechnung und der erreichten Punktzahl in ausgewählten Klausuraufgaben einer Mathematikvorlesung untersucht, die als Lernleistung bezeichnet wird. Dabei erweisen sich die Note der Hochschulzugangsberechtigung (HZB) sowie die Leistung im Abschlusstest des Selbstlernbausteins als wesentliche Prädiktoren für die Lernleistung. Es zeigt sich ein positiver Zusammenhang zwischen Abschlusstest und Lernleistung, der auch nach Kontrolle der HZB-Note signifikant bleibt. Dies weist darauf hin, dass der Selbstlernbaustein unabhängig von der HZB-Note zur Leistungssteigerung beiträgt. Zudem zeigt sich, dass die HZB-Note die Beziehung zwischen Abschlusstest und Lernleistung nicht moderiert, so dass Studierende mit unterschiedlichen HZB-Noten in vergleichbarem Maß vom Selbstlernbaustein profitieren. Dies deutet auf eine heterogenitätssensitive Wirksamkeit des Bausteins hin.

### Abstract

This study examines the relationship between the successful completion of a digital self-study module on differential and integral calculus and the score achieved in selected exam tasks of a mathematics lecture, which is referred to as learning performance. The grade of the university entrance qualification (HZB) and the performance in the final test of the self-study module proved to be significant predictors of learning performance. There is a positive correlation between the final test and learning performance, which remains significant even after controlling for the HZB grade. This indicates that the self-learning module contributes to an increase in performance regardless of the HZB grade. It also shows that the HZB grade does not moderate the relationship between the final test and learning performance, meaning that students with different HZB grades benefit from the self-study module to a comparable extent. This indicates a heterogeneity-sensitive effectiveness of the module.

### 1 Einleitung

Studierende verfügen häufig über unzureichende Schulkenntnisse in den an der Hochschule vorausgesetzten Kenntnissen der Differential- und Integralrechnung. Aufgrund einer hohen Stoffdichte fehlt die Zeit, die Auffrischung dieser Kenntnisse in die Vorlesungen zu integrieren. Daher wurde am Service Center Digitale Aufgaben des Instituts für die Entwicklung und Erforschung von Studium und Lehre (IEESL) der OTH Amberg-Weiden ein digitaler Selbstlernbaustein zur Differential- und Integralrechnung entwickelt, der auf eine breite Einsetzbarkeit fokussiert. Der Einsatz des Selbstlernbausteins wurde im Sommersemester 2024 in der Vorlesung „Mathematik II

für Ingenieure“ von Prof. Dr. Harald Schmid an der Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik evaluiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse vorgestellt.

### 2 Theoretische Grundlagen

Mit dem durch die Corona-Pandemie ausgelösten Digitalisierungsschub hat die Entwicklung und Verbreitung von Selbstlernkursen erheblich an Dynamik gewonnen [1]. Digitale Medien beeinflussen den Lernerfolg allerdings nur dann positiv, wenn sie zielgerichtet eingesetzt werden. Insbesondere aktive Lernformen, die digitale Technologien sinnvoll integrieren, können das hochschulische Lernen bereichern [2]. Für den erfolgreichen

Einsatz von Selbstlerneinheiten ist es entscheidend, eine hohe Relevanz des Aufgabenwertes sicherzustellen [3], da dieser als zentraler Faktor für akademischen Erfolg gilt [4]. Eine fundierte Gestaltung erfordert daher die Berücksichtigung sowohl fachdidaktischer Erkenntnisse als auch theoretischer Grundlagen. Dabei relevante kognitionspsychologische Theorien sind die Cognitive Load Theory [5] und die Cognitive Theory of Multimedia Learning [6] sowie motivationale Theorien [7]. Die Herausforderung in der Entwicklung von Selbstlernbausteinen besteht darin, die theoretischen Erkenntnisse in eine kohärente und didaktisch sinnvolle Struktur zu überführen und digitale Elemente adaptiv einzusetzen. Im Folgenden werden zentrale Aspekte beleuchtet, die zu einer gelungenen Konzeption beitragen können und im Selbstlernbaustein berücksichtigt wurden.

**Lightboardvideos:** In interaktiven Lightboardvideos, die im Kompetenzzentrum Digitale Lehre produziert werden können, wird durch dynamisches Zeichnen und das Blickführungsprinzip die Aufmerksamkeit der Lernenden gezielt auf relevante Inhalte gelenkt, was die kognitive Belastung reduziert [8]. Durch die Integration interaktiver Aufgaben (H5P) wird die Aufmerksamkeitsspanne erhöht.

**STACK:** Studien belegen die Lernförderlichkeit von Feedback [9]. Das an der OTH Amberg-Weiden durch das Service Center Digitale Aufgaben betreute Moodle-Plugin STACK [10] bietet adaptive Feedbackmöglichkeiten, wodurch Erwerb von deklarativem, prozeduralem und metakognitivem Wissen innerhalb der digitalen Lernumgebung ermöglicht wird. Durch die Integration dynamischer Geometrie (JSXGraph) wird die aktive Beteiligung Lernender und das Verständnis komplexer mathematischer Konzepte darstellungsvernetzend gefördert.

**Cognitive Load:** Menschen haben begrenzte Kapazitäten für die Verarbeitung visueller und verbaler Informationen [5]. Zwei bewährte kapazitätsschonende Strategien sind Worked Examples und Guidance Fading. Während Worked Examples Schritt-für-Schritt durch komplexe Probleme führt und so die kognitive Belastung verringert, wird die Unterstützung bei Guidance Fading schrittweise reduziert, um Lernende zur selbstständigen Problemlösung zu befähigen.

**Gamification:** Unter Gamification versteht man die Anwendung spieltypischer Elemente in spielfremden Kontexten [11]. In Form von Belohnungen, Auszeichnungen und vielen weiteren spieltypischen Elementen begleitet Gamification den menschlichen Alltag bereits seit Jahrhunderten. Im Lernkontext steigert sie die akademische Leistung [12], zeigt positive Effekte auf Engagement, Motivation und Leistung im Mathematikunterricht [13] und kann passives Lernen in aktive Auseinandersetzung überführen [14].

### 3 Aufbau des Selbstlernbausteins

Der Selbstlernbaustein besteht aus sechs Kapiteln. Im ersten Kapitel werden Differenzen- und Differenzialquotient sowie der Begriff der ersten Ableitung eingeführt. In Kapitel 2 werden alle Ableitungsregeln behandelt, worauf Kapitel 3 mit der Behandlung lokaler und globaler Extrema aufbaut. In Kapitel 4 werden Monotonieverhalten und Zusammenhänge zu Extrema von Funktionen behandelt. In Kapitel 5 erfolgt eine Einführung in die Grundlagen der Integralrechnung (Flächenproblem, bestimmtes Integral, Stammfunktion, unbestimmtes Integral, Hauptsatz der Differenzial- und Integralrechnung). Im abschließenden Kapitel 6 werden Integrationsmethoden (partielle Integration und Integration durch Substitution) behandelt. Für jedes Kapitel ist eine Bearbeitungszeit von ca. 90 Minuten vorgesehen. Am Ende des Kurses ist ein Abschlusstest mit einer Bearbeitungszeit von 60 Minuten zu absolvieren. Dieser wird freigeschaltet, sobald alle sechs Kapitel bearbeitet wurden. Die Studierenden haben für diesen Abschlusstest einen Versuch. Der Test ist bestanden, wenn mind. 12 von 24 Punkten erreicht wurden.

Die Entwicklung des Lernbausteins erfolgte sowohl theoriegeleitet auf der Grundlage der in Abschnitt 2 beschriebenen Theorien als auch basierend auf dem langjährigen Erfahrungsschatz der Dozierenden und des Entwicklungsteams [15]. Exemplarisch seien einige Bestandteile des Lernbausteins genannt, die evidenz- und erfahrungsbasiert zu einer erhöhten Lernwirksamkeit beitragen können.

Die wichtigsten Inhalte und Konzepte im Kurs werden mit interaktiven Lightboardvideos [16] erklärt (21 Videos, Länge von 4-12 Minuten). Die Interaktionen werden mit Hilfe des Moodle-Plugins H5P realisiert, so dass die Lernenden während der Videos regelmäßig aktiv in den Lernprozess eingebunden werden (z. B. durch ein selbstständiges Berechnen von Ableitungen oder Beantworten von MC-Fragen). Die interaktiven Lightboardvideos werden durch kurze Texte zur Vermittlung der Inhalte ergänzt.

Nach dem inhaltlichen Teil sind in allen Kapiteln Moodle-Tests mit STACK-Aufgaben (inkl. JSXGraph) implementiert [vgl. 17]. Die lernförderlichen Vorteile der Aufgaben bestehen in deren parameterbasierten Randomisierung, die Lernenden ein beliebig häufiges Üben mit strukturgleichen Aufgaben erlaubt sowie dem individuellen, adaptiven Feedback [18] und einer möglichen Mehrschrittigkeit [19]. Alle Lernenden werden durch ein vorgeschaltetes Syntaxtraining in die Verwendung der Notation eingeführt.

Mathematik lebt vom Üben und kann durch Lernen am Beispiel unterstützt werden. Daher werden den Lernenden neben den digitalen Testaufgaben in Moodle zusätzliche Übungsaufgaben als Worked Examples mit vollständigen

digen oder lückenhaften Lösungen (Guidance Fading) zur Verfügung gestellt.

Schließlich wurde der Lernbaustein gamifiziert. Um die Vorteile von Gamification zu nutzen, wurde vom Service Center Digitale Aufgaben der OTH Amberg-Weiden nur die Struktur gamifiziert, d.h. im Moodle-Kurs wurden spielerische Elemente mit Badges, Level-Up und Stash [20] integriert, ohne inhaltlich einzugreifen. Diese Form der Gamification kann Motivation und Orientierung stärken, ohne das Lernen zu überlagern oder leistungsstarke Studierende durch unangemessene Belohnungen zu demotivieren.

## 4 Forschungsfragen

Um den Zusammenhang zwischen dem Absolvieren des Selbstlernbausteins und den dadurch geförderten klausurrelevanten Fertigkeiten in der Differenzialrechnung untersuchen zu können, wurden in einer Voruntersuchung die signifikanten Prädiktoren für die Leistung in zwei Aufgaben der Abschlussklausur (Lernleistung) bestimmt, die einen direkten Bezug zu den Inhalten des Selbstlernbausteins aufweisen. Dafür wurde eine Rückwärtsselektion [21] mit Alter, Geschlecht, Art der HZB, HZB-Note und dem Studiengang der Klausurteilnehmenden als unabhängige Variablen und der Leistung in den beiden relevanten Klausuraufgaben als abhängige Variable durchgeführt. Im Modell mit der höchsten Varianzaufklärung ( $\Delta R^2 = .19$ ) waren die HZB-Note ( $\beta = -.31, p = .02$ ) und die Leistung im Abschlusstest ( $\beta = .26, p = .04$ ) signifikante Prädiktoren, woraus sich folgende Forschungsfragen ableiten:

**Forschungsfrage 1 (F1):** Inwiefern besteht ein Zusammenhang zwischen der Leistung im Abschlusstest des digitalen Lernbausteins und der in der Klausur gezeigten Lernleistung unter Kontrolle der HZB-Note?

**Forschungsfrage 2 (F2):** Inwiefern moderiert die HZB-Note den Zusammenhang zwischen der Leistung im Abschlusstest und der Lernleistung?

Während mit F1 untersucht wird, ob das Absolvieren des Lernbausteins nach Herausrechnen der HZB-Note noch signifikant bleibt, gibt F2 Aufschluss darüber, ob Studierende mit unterschiedlichen HZB-Noten unterschiedlich stark vom digitalen Selbstlernbaustein profitieren.

## 5 Methodik

### 5.1 Untersuchungsdesign

Zur Beantwortung von F1 wurde die Partialkorrelation zwischen Abschlusstest und Lernleistung (siehe Abschnitt 4) unter Kontrolle der HZB-Note bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = .05$  ermittelt.

Zur Beantwortung von F2 wurde eine Moderationsanalyse durchgeführt, durch die untersucht wird, inwiefern die HZB-Note die Beziehung zwischen der Punktzahl im Abschlusstest und der Lernleistung moderiert. Konkret wurde geprüft, inwiefern sich die individuelle HZB-Note auf den Zusammenhang zwischen der Punktzahl im Abschlusstest des Lernbausteins und der Lernleistung auswirkt.

### 5.2 Stichprobe

Insgesamt nahmen 79 Studierende an der Semesterabschlussklausur teil, wovon 63 den Abschlusstest des Selbstlernbausteins absolviert hatten und in die Studie eingeschlossen wurden. 12 der Studierenden sind weiblich, 51 männlich. Die Studierenden gehörten den Bachelorstudiengängen Maschinenbau, Motorsport Engineering, Ingenieurpädagogik und Mechatronik sowie digitale Automation der OTH Amberg-Weiden an und hatten ein Durchschnittsalter von 21,4 Jahren. Die durchschnittliche HZB-Note ist 2,45. Die HZB wurde wie folgt erworben: Gymnasium ( $n = 26$ ), FOS Technik ( $n = 18$ ), Fachschule ( $n = 5$ ), BOS ( $n = 4$ ), allg. Hochschulreife Erwerb im Ausland ( $n = 4$ ), Fachgymnasium ( $n = 2$ ), Berufsfachschule, FOS Sozialwesen, Gesamtschule und Studienkolleg (jeweils  $n = 1$ ).

## 6 Ergebnisse und Interpretation

Die Korrelationsanalyse zeigt einen moderat positiven Zusammenhang zwischen Abschlusstest und Lernleistung ( $r = .38, p = .00$ ), der nach Herauspartialisierung der HZB-Note weiterhin signifikant ( $r = .26, p = .04$ ) und knapp moderat bleibt [22]. Der Abschlusstest erweist sich somit als relevanter Prädiktor für die Lernleistung.

Die Moderationsanalyse weist zwei signifikante Haupteffekte auf: Der Abschlusstest wirkt sich positiv und eine schlechtere HZB-Note negativ auf die Lernleistung aus ( $\beta = 0.26, p = .05$  bzw.  $\beta = -0.31, p = .02$ ). Der Moderationseffekt, also die mögliche Wechselwirkung zwischen HZB-Note und der Beziehung zwischen Abschlusstest und Lernleistung, ist nicht signifikant ( $\beta = 0.01, p = .96$ ).

Die Werte der Korrelation und Partialkorrelation deuten darauf hin, dass bessere Leistungen im Abschlusstest mit besserer Lernleistung in der Klausur einhergehen – auch nach Kontrolle der HZB-Note. Studierende, die im Abschlusstest besser abschneiden, erzielen auch höhere Punktzahlen in der Klausur. Das spricht für die Effektivität des Lernbausteins unabhängig vom Vorwissen.

Die Fragestellung der Moderationsanalyse war, ob der Lernbaustein bestehende Leistungsunterschiede zwischen Studierenden mit guter und weniger guter HZB-Note ausgleichen kann. Die Analyse zeigt, dass die HZB-Note den Zusammenhang zwischen Abschlusstest und

Lernleistung nicht moderiert. Das bedeutet, dass Studierende mit unterschiedlichen HZB-Noten in gleicher Weise von der Nutzung des digitalen Lernbausteins profitieren, was dessen heterogenitätssensitive Wirksamkeit unterstreicht.

Durch diese Ergebnisse können die beiden Forschungsfragen wie folgt beantwortet werden:

**Zu F1:** Die Leistung im Abschlusstest weist unabhängig von der HZB-Note einen signifikanten Zusammenhang zur Lernleistung in der Klausur auf.

**Zu F2:** Die HZB-Note moderiert den Zusammenhang zwischen Abschlusstest und Lernleistung nicht. Studierende mit unterschiedlicher HZB-Note profitieren in vergleichbarer Weise vom Selbstlernbaustein.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend stützt die vorliegende Untersuchung eine heterogenitätssensitive Wirksamkeit des Lernbausteins: Unabhängig von den individuellen Vorkenntnissen

(operationalisiert durch die HZB-Note) weist die Leistung im Abschlusstest des Lernbausteins einen signifikant positiven Zusammenhang zur Lernleistung in der Klausur auf. Auch die HZB-Note weist einen signifikanten Zusammenhang zur Lernleistung in der Klausur auf, sie hat allerdings keinen Einfluss auf die Stärke des Zusammenhangs zwischen der Leistung im Abschlusstest des Lernbausteins und der Lernleistung in der Klausur. Diese Ergebnisse lassen sich in den Kontext bestehender Forschungsarbeiten zur Studienabbruchforschung und MINT-Bildung einordnen. Modelle der Studienabbruchforschung [23] zeigen, dass zahlreiche Faktoren den Studienerfolg beeinflussen, wobei die HZB-Note als zentraler Prädiktor gilt. Gemäß Falk und Marschall [24] reduziert eine um einen Notengrad bessere HZB-Note die Abbruchquote um 34%. Folglich können digitale Selbstlernangebote in einer Grundvorlesung zur Ingenieurmathematik dazu beitragen, das Risiko eines Studienabbruchs zu verringern und dies unabhängig von der HZB-Note. Eine Implikation für die Lehre ist, Selbstlerneinheiten in wohl dosierter Form bei Themen einzusetzen, die aus der Schule bekannt sein sollten und in der Vorlesung nicht wiederholt werden können.

---

### Referenzen:

- [1] J. Hafer, P. Kostädt und U. Lucke, „Das Corona-Virus als Treiber der Digitalisierung?“, in *Wie Corona die Hochschullehre verändert: Erfahrungen und Gedanken aus der Krise zum zukünftigen Einsatz von eLearning*, U. Dittler und C. Kreidl, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021, S. 219-242.
- [2] M. Sailer, R. Maier, S. Berger, T. Kastorff und K. Stegmann, „Learning activities in technology-enhanced learning: A systematic review of meta-analyses and second-order meta-analysis in higher education“, *Learning and individual differences*, Bd. 112, Art. 102446, April 2021.
- [3] C. Quesada-Pallarès, A. Sánchez-Martí, A. Ciraso-Calí und P. Pineda-Herrero, „Online vs. classroom learning: Examining motivational and self-regulated learning strategies among vocational education and training students“, *Frontiers in Psychology*, Bd. 10, Art. 2795, Dezember 2019.
- [4] M. Aristeidou, E. Scanlon und M. Sharples, „Profiles of engagement in online communities of citizen science participation“, *Computers in Human Behavior*, Bd. 74, S. 246-256, September 2017.
- [5] J. Sweller, P. Ayres und S. Kalyuga, *Cognitive Load Theory*, 1. Aufl., New York, USA: Springer Media, 2011. [Online]. Verfügbar: <https://tinyurl.com/mr22c9dz>. Zugriff am 30. Mai 2025.
- [6] R. E. Mayer, „The past, present, and future of the cognitive theory of multimedia learning“, *Educational Psychology Review*, Bd. 36, Nr. 1, Januar 2024. doi: 10.1007/s10648-023-09842-1.

- [7] R. M. Ryan und E. L. Deci, "Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being", *American Psychologist.*, Bd. 55, S. 68-78, Januar 2000.
- [8] R. E. Mayer, L. Fiorella und A. Stull, "Five ways to increase the effectiveness of instructional video", *Educational Technology Research and Development*, Bd. 68, Nr. 3, S. 837-852, Februar 2020.
- [9] J. Hattie und H. Timperley, "The power of feedback", *Review of Educational Research*, Bd. 77, Nr. 1, S. 81-112, März 2007. doi: 10.3102/003465430298487.
- [10] C. J. Sangwin, *Computer aided assessment of mathematics*, Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [11] S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled und L. Nacke, "From game design elements to gamefulness: defining 'gamification'", in *MindTrek '11, Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference: Envisioning Future Media Environments*, September 2011, S. 9-15.
- [12] L. Aguiar-Castillo, A. Clavijo-Rodriguez, L. Hernández-López, P. de Saa-Pérez und R. Pérez-Jiménez, "Gamification and deep learning approaches in higher education", *Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism Education*, Bd. 29, Art. 100290, November 2021. doi: 10.1016/j.jhlste.2020.100290.
- [13] N. T. Jutin und S. M. B. Maat, "The effectiveness of gamification in teaching and learning mathematics: A systematic literature review", *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, Bd. 13, Nr. 1, S. 1290-1309, Februar 2024.
- [14] J. Chen und M. Liang, "Play hard, study hard? The influence of gamification on students' study engagement", *Frontiers in Psychology.*, Bd. 13, Art. 994700, Oktober 2022.
- [15] K. Dechant-Herrera, M. Altieri und S. Bach, „Vergleichende Analyse der Lernleistung zwischen einem digitalen Selbstlernkurs und einer inhaltsgleichen Präsenzeinheit zur Ingenieurmathematik“, in *Diversität und Digitalität in der Hochschullehre*, T. Witt, C. Herrmann, L. Mrohs, H. Brodel, K. Lindner und I. Maidanjuk, Hrsg., Bielefeld: transcript Verlag, 2024, S. 117-128.
- [16] L. Riedl, *Produktregel* (15. November 2023). Zugriff: 22. April 2025. [Online Video]. Verfügbar: <https://h5p.org/node/1461519>.
- [17] J. Knaut, M. Altieri und S. Bach, „Digitale Aufgaben mit STACK“, Moodle Lernplattform. Zugriff: 03. Juni 2025. [Online]. Verfügbar: <https://tinyurl.com/5n6p7tv2>
- [18] J. Knaut, M. Altieri, S. Bach, I. Strobl und K. Dechant, "A theory-based approach of feedback in STACK-based Moodle quizzes taking into account self-regulation and different proficiency of learners", *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, Bd. 17, Nr. 23, S. 38-55, Dezember 2022. doi: 10.3991/ijet.v17i23.36425.
- [19] M. Altieri, J. Horst, M. Kallweit, K. Landefeld und M. Persike, *Multi-step procedures in STACK tasks with adaptive flow control*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3944786>
- [20] J. Weber, „Gamification für die Lehre“, Moodle Lernplattform. Zugriff: 03. Juni 2025. [Online]. Verfügbar: <https://moodle.oth-aw.de/blocks/demologin/logindemo.php?course=GamificationDemo>
- [21] M. Bühner und M. Ziegler, *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler Grundlagen und Umsetzung mit SPSS und R*, 2. Aufl., Pearson Deutschland, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9783863268091>
- [22] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioral sciences*, 2. Aufl., Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1988.
- [23] V. Tinto, „Dropout from higher education: A theoretical synthesis of recent research“, *Review of Educational Research*, Bd. 45, Nr. 1, S. 89-125, März 1975, doi: 10.3102/00346543045001089.
- [24] S. Falk und M. Marschall, „Abbruch des Erststudiums bei MINT-Studierenden: Welche Rolle spielen Informations- und Unterstützungsangebote bei Studienbeginn?“, in *Studienerfolg und Studienabbruch*, M. Neugebauer, H.-D. Daniel und A. Wolter, Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021, S. 343-366.

### **Fördergeber:**

Die Publikation ist Teil des Projekts Innovationsnetzwerk für digitale adaptive Lehre (Ideal), das von der Stiftung Innovation in der Hochschullehre von 2021-2025 gefördert wird (Förderkennzeichen FBM2020-EA-2870-07550, Projektleiter Prof. Dr. Mike Altieri, OTH Amberg-Weiden). Die Autoren bedanken sich bei den Fördermittelgebern und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.

Gefördert durch die



**Stiftung  
Innovation in der  
Hochschullehre**

## **KONTAKT**



**Prof. Dr. paed. Dipl.-Math. Mike Altieri**

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

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



**Katja Dechant-Herrera, M.A., B.Sc.**

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



**Prof. Dr. Leonhard Riedl**

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

[le.riedl@oth-aw.de](mailto:le.riedl@oth-aw.de)

# Gamification in der Lehre: Motivationshilfe, nerviges Beiwerk – oder beides?

## Zusammenfassung

Gamification in der Lehre gilt als theoretisch fundierte Maßnahme, um Motivation und Lernerfolg zu steigern. In zwei Lehrveranstaltungen zur Ingenieurmathematik mit gamifizierten Selbstlerneinheiten zeigte sich jedoch eine polarisierte Wahrnehmung der Studierenden. Viele bewerteten Gamification sehr positiv, andere sehr negativ, während mittlere Einschätzungen seltener waren. Dieses Muster war ursprünglich ein unbeabsichtigtes Neben-ergebnis und wurde daher in der aktuellen Studie gezielt weiter untersucht. Dabei wurde beim Einsatz einer Selbstlerneinheit zur Differenzial- und Integralrechnung geprüft, inwiefern sich die bimodale Verteilung bestätigt und durch qualitative Analysen erfasst, welche Gründe ihr zugrunde liegen. Die Ergebnisse stützen das Befundmuster: Ein Teil der Studierenden berichtet von erhöhter Motivation und erlebtem Fortschritt durch die Gamification-Elemente, während ein anderer Teil diese als nutzlos und wenig zielführend empfindet. Daraus resultierende Implikationen für die Gestaltung gamifizierter Lehr-Lern-Formate werden abschließend diskutiert.

## Abstract

Gamification in education is considered a theoretically well-founded approach to enhancing motivation and learning outcomes. However, in two engineering mathematics courses with gamified self-study units, students' perceptions proved to be polarized: many evaluated gamification very positively, others very negatively, while moderate assessments were rare. This pattern initially emerged as an unintended side result and was therefore systematically examined in the present study. Using a self-study unit on differential and integral calculus, we investigated whether the bimodal distribution could be replicated and conducted qualitative analyses to explore the underlying reasons. The findings support this pattern: one group of students reported increased motivation and a stronger sense of progress through the gamification elements, whereas another group perceived them as useless and ineffective. Implications for the design of gamified teaching and learning formats are discussed in conclusion.

## 1 Einleitung und theoretischer Hintergrund

Unter Gamification versteht man den Einsatz spieltypischer Elemente in spielfremden Kontexten [1]. In Form von Belohnungen, Abzeichen, Ranglisten und anderen Mechanismen begleitet sie den menschlichen Alltag bereits seit Jahrhunderten – lange bevor der Begriff selbst geprägt wurde. Heute ist Gamification insbesondere aus dem digitalen App-Alltag nicht mehr wegzudenken: Fitness-Apps belohnen das Erreichen von Schrittzahlen, Sprachlern-Apps vergeben Punkte und Levelaufstiege für kontinuierliches Lernen und Shopping-Apps nutzen Treuepunkte.

Die Wirksamkeit von Gamification lässt sich unter anderem mit Motivationstheorien gut erklären. Die Motivationstheorie von Heckhausen und Heckhausen [2] beispielsweise beschreibt Motivation als zielgerichtete Verhaltensausrichtung, deren Stärke sich aus dem subjektiven Wert eines Ziels (Anreiz) und der Erwartung, dieses Ziel erreichen zu können (Erfolgserwartung), ergibt. Gamification greift gezielt in diese Mechanismen ein: Fortschrittsanzeigen, Punktesysteme oder Belohnungen machen Lernfortschritte sichtbar und emotional positiv erfahrbar. Rückmeldungen durch Quizformate oder Levels stärken das Vertrauen in die eigene Kompetenz und können so die wahrgenommene Selbstwirksam-

keit fördern. Eine weitere etablierte Motivationstheorie ist die Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan [3]. Demnach entsteht intrinsische Motivation insbesondere dann, wenn Lernumgebungen die drei universellen psychologischen Grundbedürfnisse Autonomie, Kompetenz und soziale Eingebundenheit erfüllen. Gamifizierte Lernformate, die diese Bedürfnisse adressieren, fördern folglich situatives Interesse, freiwilliges Engagement und die langfristige Selbstverpflichtung zum Lernen.

In der Hochschullehre stellt die Integration von Gamification eine Herausforderung dar. Aspekte wie Interesse und persönliche Bedeutung beeinflussen, wie motivierend eine Aufgabe empfunden wird [4]. Daher wirkt Gamification nicht bei allen gleich: Was für die einen motivierend wirkt, kann andere überfordern oder demotivieren. Studien zeigen das Potenzial gamifizierter Elemente, betonen aber auch ihre kontext- und personenbezogene Wirksamkeit [5]. Besonders effektiv sind sie, wenn sie zu den Zielen und Interessen der Lernenden passen [6]. Wird Gamification als störend erlebt, kann sie die kognitive Belastung bei Lernenden erhöhen [7]. Unterschiedliche Lernvoraussetzungen, Vorerfahrungen und Motivation erschweren generalisierbare Aussagen und machen deutlich, dass Gamification sorgfältig geplant und eingesetzt werden muss. Gamification kann ein wirksames Instrument zur Motivationsförderung sein, sofern die eingesetzten Elemente didaktisch fundiert und zielgruppenspezifisch konzipiert sind [8].

## 2 Beschreibung der Lernumgebung und Forschungsfrage

Die digitale Selbstlerneinheit bereitet zentrale Themen der Differenzial- und Integralrechnung auf, die zum großen Teil im Schulunterricht behandelt werden. Die Einheit wird vorlesungsbegleitend zur Auffrischung bereitgestellt und eine erfolgreiche Bearbeitung mit einem Notensprung in der Modulabschlussprüfung belohnt. Eine ausführliche Beschreibung der didaktischen und technischen Details sowie der Einbettung in die Lehrveranstaltung findet sich in [9], eine Darstellung der Gamification-Elemente in [10].

Nachdem zwei Studien [9] [11] zum selbstregulierten Lernen mit digitalen Selbstlerneinheiten in der Ingenieurmathematik als Nebenresultat auf eine polarisierte Wahrnehmung von Gamification durch die Studierenden hindeuteten, wird mit der vorliegenden Untersuchung gezielt überprüft, ob sich die resultierende bimodale Verteilung bestätigt und was die Gründe hierfür sind. Die Forschungsfrage lautet entsprechend:

**Inwiefern bestätigt sich eine polarisierte Wahrnehmung von Gamification-Elementen durch Studierende in der eingesetzten Selbstlerneinheit und was sind gegebenenfalls Gründe für die bimodale Verteilung dieser Wahrnehmung?**

## 3 Methodisches Vorgehen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde im Sommersemester 2025 ein Mixed-Methods-Design umgesetzt: eine quantitative Erhebung mit fünf geschlossenen Einzelfragen auf einer sechsstufigen Likert-Skala (1 = stimme überhaupt nicht zu bis 6 = stimme voll und ganz zu) wurde durch qualitative Freitextfragen ergänzt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten konnten allerdings nur drei Fragen vollständig ausgewertet und in die vorliegende Untersuchung einbezogen werden.

Zwei der drei Fragen wurden durch eine offene Anschlussfrage ergänzt („Erläutern Sie bitte kurz, warum Sie sich für diese Einschätzung entschieden haben.“). Dabei handelte es sich um die Fragen „Die Rennbahn mit den Kapiteln als Wegpunkten, hat mich motiviert den Lernbaustein bis zum Ziel durchzuarbeiten.“ (*A: Anreiz*) und „Durch das Erhalten von Badges, Verkehrshütchen und Level habe ich deutlich wahrgenommen, dass ich Aufgaben gemeistert habe.“ (*B: Erfolgserleben*). Die dritte Frage „Ich habe die Rennbahn als Übersicht für meinen Lernfortschritt genutzt.“ (*C: Fortschrittsübersicht*) wurde ausschließlich quantitativ analysiert, da sie auf die funktionale Nutzung eines einzelnen Elements abzielte. Die Teilnahme war freiwillig und fand anonym über einen Moodle-Kurs statt. Die quantitativen Antworten wurden hinsichtlich Verteilungsform, Mittelwerten und Standardabweichungen analysiert und durch Histogramme mit Dichtekurven dargestellt. Die qualitative Auswertung erfolgte nach dem Vertiefungsmodell [12] in einem induktiv-deduktiven Verfahren. Zunächst wurden die Aussagen valenzbasiert (positiv, neutral, negativ) kategorisiert und anschließend innerhalb dieser Gruppen inhaltlich differenziert. Es nahmen insgesamt 65 Studierende an der Erhebung teil. Nach Ausschluss unvollständiger Datensätze verblieb eine Stichprobe von  $N = 51$  (41 männlich, 9 weiblich, 1 divers), mit einem Durchschnittsalter von  $M = 21.11$  Jahren ( $SD = 2.38$ ).

## 4 Ergebnisse

Die drei auswertbaren Fragen zu den Gamification-Elementen zeigen unterschiedliche Mittelwerte ( $M_A = 3.35$ ;  $M_B = 2.86$ ;  $M_C = 3.84$ ) bei hohen Standardabweichungen ( $SD_A = 1.74$ ,  $SD_B = 1.54$ ,  $SD_C = 1.99$ ). Abbildung 1 verdeutlicht die Verteilung der Antworten auf die Fragen A (Anreiz), B (Erfolgserleben) und C (Fortschrittsübersicht).

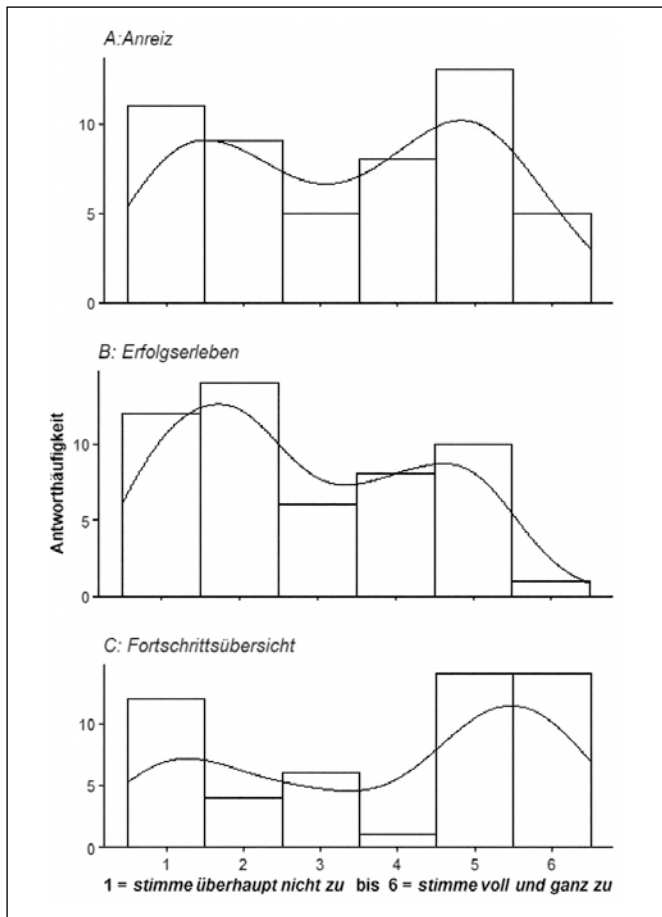


Abbildung 1: Einschätzung der Studierenden zu gamifizierten Elementen der Selbstlerneinheit

Im Rahmen der qualitativen Analyse wurden die Freitextantworten der Studierenden zunächst nach Valenz (positiv, neutral, negativ) sortiert. Innerhalb dieser Gruppen erfolgte eine induktive Kategorienbildung. Tabelle 1 (A: Anreiz) und 2 (B: Erfolgserleben) geben einen Überblick über diese Strukturierung.

Tabelle 1: Studierendenäußerungen zu A: Anreiz (Rennbahn als Anreiz zur Zielerreichung)

Meinungsäußerungen	Beispiel	Anzahl, n (%)
<b>Positiv</b>		17 (32.69)
Motivationswirkung	„Die Fortschrittsvisualisierung mit der Rennbahn war gut.“	15
Didaktischer Mehrwert	„Die Visualisierung mit der Rennbahnstrecke fand ich mega – sie hat mir richtig geholfen, meinen Fortschritt zu sehen und motiviert weiterzumachen.“	2
<b>Neutral</b>		7 (13.46)
Motivationswirkung	„Die Gamification war für mich nur ein Nebending, das ich kaum wahrgenommen habe.“	4
Didaktischer Mehrwert	„Das Thema Motorsport war eine nette Idee, jedoch nicht der entscheidende Faktor für das Mitarbeiten.“	3

<b>Negativ</b>		28 (53.85)
Motivationswirkung	„Ich würde persönlich eine trockenere Gestaltung, ohne einen spielerischen Aspekt bevorzugen.“	9
Technische Hürden	„Ich hatte mehrere Autos und konnte dennoch nichts damit freischalten.“	8
Bedienung / Aufgabenstellung	„So ist mir selbst am Ende des Lernbausteins nicht klar, was die Items oder das Tauschen mir gebracht haben.“	3
Didaktischer Mehrwert	„Jedoch empfinde ich das Itemsammeln und -tauschen als nicht sinnvoll, da diese für mich keinen weiteren Nutzen haben.“	8

Tabelle 2: Studierendenäußerungen zu B: Erfolgserleben (Badges, Verkehrshütchen und Level)

Meinungsäußerungen	Beispiel	Anzahl, n (%)
<b>Positiv</b>		4 (21.05)
Motivationswirkung	„Ich habe zumindest deutlicher mitgekriegt, dass ich [einen] Fortschritt gemacht habe.“	4
<b>Neutral</b>		3 (15.79)
Motivationswirkung	„Habe nur auf die Ergebnisse geachtet, nicht auf Badges.“	1
Didaktischer Mehrwert	„Ich habe die Badges und Verkehrshütchen angenommen und dann sofort wieder vergessen, ich habe mich da eher auf meine Selbsteinschätzung verlassen.“	2
<b>Negativ</b>		12 (63.16)
Motivationswirkung	„Diese Badges oder Items hatten für mich keinen tieferen Sinn oder Nutzen.“	7
Bedienung / Aufgabenstellung	„Verschiedene Systeme aus Hütchen, Autoteilen und Streckenabschnitten fand ich verwirrend.“	2
Didaktischer Mehrwert	„Wenn es das nicht gegeben hätte, hätte man es definitiv nicht vermisst.“	3

## 5 Interpretation der Ergebnisse und Beantwortung der Forschungsfrage

Die Daten zeigen eine hohe Heterogenität mit Tendenz zu Extremwerten. Die Histogramme unterstreichen die polarisierte Wahrnehmung von Gamification durch die Studierenden in der eingesetzten Selbstlerneinheit. Die Dichtekurven zeigen eine entsprechend bimodale (U-förmige) Verteilung: Ein Teil der Studierenden empfand Gamification als hilfreich, ein anderer Teil als wenig hilfreich. In

den Freitextantworten werden die Gründe hierfür deutlich, so dass sich die Forschungsfrage wie folgt beantworten lässt:

Die in zwei vorangegangenen Untersuchungen von Selbstlerneinheiten zur Ingenieurmathematik als Nebenresultat beobachtete polarisierte Wahrnehmung von Gamification bestätigt sich deutlich. Gründe für eine positive Wahrnehmung sind insbesondere die Motivation zur Selbstregulation und die Wahrnehmung des eigenen Fortschritts. Gründe für eine negative Wahrnehmung sind vor allem ein nicht erkennbarer Nutzen der Gamification-Elemente.

## 6 Diskussion und Implikationen für die Lehre

Die Untersuchung bestätigt im vorliegenden Fall eine polarisierte Wahrnehmung von Gamification-Elementen bei Studierenden. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist allerdings durch methodische Einschränkungen begrenzt: Zwei von fünf Fragen konnten aufgrund technischer Pro-

bleme nicht ausgewertet werden, wodurch relevante Aspekte unberücksichtigt blieben. Zudem basiert die Studie auf einer kleinen, fachspezifischen Stichprobe, was die Generalisierbarkeit einschränkt. Dennoch liefern die Freitextantworten aufschlussreiche Hinweise zu den Gründen der polarisierten Wahrnehmung von Gamification durch Studierende. Für die Lehre empfiehlt es sich, beim Einsatz von Gamification die Wahrnehmung durch die Lernenden im jeweiligen Fall zu evaluieren. Im Falle einer polarisierten Wahrnehmung erscheint ein optionales Angebot von Gamification zielführend, so dass Lernende selbst entscheiden können, ob sie die Lernumgebung mit oder ohne Gamification nutzen möchten. Diese Lösung würde beiden „Polen“ gerecht, d. h. sowohl den Lernenden, für die Gamification gewinnbringend ist, als auch denjenigen, für die sie nutzlos erscheint. Diese Lösung stellt allerdings erhöhte Anforderungen an die konzeptionelle Planung und technische Umsetzung. Sie könnte Gegenstand nachfolgender Entwicklungen und Untersuchungen sein.

---

### Referenzen:

- [1] S. Deterding, D. Dixon, R. Khaled, and L. Nacke, “From game design elements to gamefulness: Defining ‘gamification’,” in Proceedings of the 15th International Academic MindTrek Conference, Tampere, 2011, S. 9-15. doi: 10.1145/2181037.2181040.
- [2] J. Heckhausen und H. Heckhausen, „Motivation und Entwicklung“, in Motivation und Handeln, J. Heckhausen und H. Heckhausen, Eds., Berlin, Heidelberg, 2010, Kapitel 16, S. 545-588, [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12693-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12693-2_16)
- [3] R. M. Ryan and E. L. Deci, “Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being”, American Psychologist, Bd. 55, Nr. 1, S. 68–78, Jan. 2000, doi: 10.1037/0003-066X.55.1.68.
- [4] J. S. Eccles, “Subjective task value and the Eccles et al. model of achievement related choices”, in Handbook of Competence and Motivation, A. J. Elliot and C. S. Dweck, Eds., New York: Guilford Press, 2005, Kapitel 7, S. 105-121.
- [5] T. Pidun, „Was bringt Gamifizierung bei Ingenieur\*innen? Vergleich zweier Studiengänge in Deutschland“, Zeitschrift für Hochschulentwicklung, Bd. 16, Nr. 1, S. 165-189, März 2021, doi: 10.3217/zfhe-16-01/09.
- [6] L. Aguiar-Castillo, A. Clavijo-Rodriguez, L. Hernández-López, P. de Saa-Pérez, and R. Pérez-Jiménez, “Gamification and deep learning approaches in higher education”, Journal of Hospitality, Leisure, Sport & Tourism Education, Bd. 29, Artikelnr. 100290, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jhlste.2020.100290.
- [7] R. E. Mayer, The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819>
- [8] N. T. Jutin and S. M. B. Maat, “The effectiveness of gamification in teaching and learning mathematics: A systematic literature review”, International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development, Bd. 13, Nr. 1, S. 1290–1309, Feb. 2024, doi: 10.6007/IJARPED/v13-i1/20703.
- [9] M. Altieri, K. Dechant-Herrera und L. Riedl, „Vorlesungsbegleitende Förderung der Ableitungs- und Integrationsfertigkeiten von Studierenden durch einen digitalen Selbstlernbaustein – Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Abschlusstest und Klausurleistung in einer Mathematikvorlesung an der OTH Amberg-Weiden“, Forschungsbericht 2026, OTH Amberg-Weiden, S. 28-33, ISSN: 2365-1997, [Online] verfügbar: [www.oth-aw.de/forschungsbericht](http://www.oth-aw.de/forschungsbericht)

- [10] L. Riedl, M. Altieri und K. Dechant-Herrera, „Beschreibung der Gamification-Elemente im Lernbaustein zur Differential- und Integralrechnung“, OTH Amberg-Weiden. Accessed: 8. September 2025. [Online]. Available: <https://www.oth-aw.de/forschung/forschungsprofil/forschungs-und-entwicklungsprojekte/ideal/veroeffentlichungen/#darstellung-der-gamification-elemente>
- [11] K. Dechant-Herrera, M. Altieri und S. Bach, „Vergleichende Analyse der Lernleistung zwischen einem digitalen Selbstlernkurs und einer inhaltsgleichen Präsenzeinheit zur Ingenieurmathematik,“ in Diversität und Digitalität in der Hochschullehre, T. Witt, C. Herrmann, L. Mrohs, H. Brodel, K. Lindner und I. Maidanjuk, Hrsg., Bielefeld: transcript Verlag, 2024, S. 117-128.
- [12] P. Mayring, Einführung in die qualitative Sozialforschung, 7., überarb. und aktual. Aufl., Weinheim: Beltz, 2023.

### Fördergeber:

Die Publikation ist Teil des Projekts Innovationsnetzwerk für digitale adaptive Lehre (IdeaL), das von der Stiftung Innovation in der Hochschullehre von 2021-2025 gefördert wird (Förderkennzeichen FBM2020-EA-2870-07550).

Gefördert durch die



Stiftung  
Innovation in der  
Hochschullehre

## KONTAKT



**Prof. Dr. paed. Dipl.-Math. Mike Altieri**

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

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



**Katja Dechant-Herrera, M.A., B.Sc.**

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



**Prof. Dr. Leonhard Riedl**

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

[le.riedl@oth-aw.de](mailto:le.riedl@oth-aw.de)

# Lernprozessbezogene Studierendenwahrnehmung von Lightboardvideos mit Interaktionen in einer digitalen Selbstlerneinheit zur Wiederholung der Grundlagen der Differenzial- und Integralrechnung

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird der Einsatz von Lightboardvideos mit Interaktionen in einer digitalen Selbstlerneinheit zur Differenzial- und Integralrechnung beschrieben. Es wird über die Bewertung des Lernprozesses durch das Medium Lightboard berichtet. Die Erhebung mittels eines Fragebogens ( $N = 57$ ) ergab eine positive Bewertung ( $M = 5.00$  auf einer sechsstufigen Likert-Skala). Besonders positiv bewertet wurden die klare Struktur, die Schritt-für-Schritt-Erklärungen sowie die visuelle Darstellung durch die Lightboardvideos. Als Implikation für die Lehre ist der Einsatz eines interaktiven Lightboards geplant, das die Interaktion mit multimedialen Inhalten auf der Schreibfläche erlaubt und dadurch die didaktischen Möglichkeiten nochmals erhöht.

## Abstract

This article describes the use of interactive lightboard videos in a digital self-learning unit on differential and integral calculus. It reports on the evaluation of the learning process using the lightboard medium. The survey, which was conducted using a questionnaire ( $N = 57$ ), yielded a positive evaluation ( $M = 5.00$  on a six-point Likert scale). The clear structure, step-by-step explanations and visual presentation through the lightboard videos were rated particularly positively. As an implication for teaching, the use of an interactive lightboard is planned, which allows interaction with multimedia content on the writing surface, thereby further increasing the didactic possibilities.

## 1 Einleitung

Lernvideos, besonders Lightboardvideos, ermöglichen eine anschauliche und verständliche Vermittlung komplexer Inhalte. Sie bieten Lernenden zudem die Flexibilität, sich Wissen selbstgesteuert und im eigenen Tempo anzueignen. Im vorliegenden Beitrag wird über den Einsatz von Lightboardvideos in einer digitalen Selbstlerneinheit zu den Grundlagen der Differenzial- und Integralrechnung berichtet, die begleitend in einer Vorlesung zur Ingenieurmathematik an der Fakultät Maschinenbau/ Umwelttechnik der OTH Amberg-Weiden eingesetzt wird. Dabei wird beleuchtet, wie Studierende das Medium Lightboard mit Blick auf ihren Lernprozess bewerten.

## 2 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden werden die verschiedenen Typen von Lernvideos vorgestellt. Außerdem wird auf Lightboardvideos

mit Interaktionen eingegangen, die als wichtiger Baustein zur Vermittlung der Inhalte der Differenzial- und Integralrechnung in der digitalen Selbstlerneinheit genutzt werden.

### 2.1 Typen von Lernvideos

Die Auswahl des richtigen Typs von Lernvideos hängt insbesondere von den Lernzielen und dem Fachinhalt ab. Durch den gezielten Einsatz können Lernende effektiv in ihrem Lernprozess unterstützt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Typen mit ihren spezifischen Merkmalen vorgestellt.

- Erklärvideo: Diese Videos erklären Konzepte oder Prozesse in klarer, meist linearer Struktur, z. B. Whiteboard-Animationen oder Screencasts [1].
- Demonstrationsvideo: Diese Videos zeigen konkrete Abläufe oder Handlungen in der Praxis auf (z. B. in

den Bereichen Medizin, Technik oder Handwerk) und sollen die Handlungskompetenz fördern, v. a. bei komplexen psychomotorischen Aufgaben [2].

- Animiertes Video: Diese Videos nutzen computer-generierte Animationen, um abstrakte oder schwer visualisierbare Inhalte (z. B. chemische Reaktionen) darzustellen [3].
- Video mit Interaktionen: Diese Videos beinhalten interaktive Elemente wie Aufgaben oder Multiple-Choice-Fragen, um die Aufmerksamkeit zu fördern und aktives Lernen zu unterstützen [4]. Hierbei werden in einer geeigneten Umgebung wie z. B. H5P oder das an der OTH Amberg-Weiden entwickelte FIVE+ [5] interaktive Elemente über ein Video gelegt.
- Dokumentarisches Video: Diese Videos sind i. d. R. professionell produziert. Sie kombinieren mehrere Darstellungsformen (z. B. Interviews und Szenen). Sie eignen sich für kontextgebundenes Lernen und die Förderung medialer Kompetenzen [6].

## 2.2 Definition von Lightboardvideos und deren Bedeutung im Lernkontext

Lightboardvideos stellen eine besondere Form von Lernvideos dar, bei der die Lehrperson auf einer transparenten Glasfläche schreibt, während sie gleichzeitig zur Kamera und somit zu den Lernenden spricht. Diese Kombination ermöglicht eine hohe Sichtbarkeit der Inhalte und der Lehrperson. Dadurch wird Präsenz erzeugt, die sich positiv auf das Lernen auswirken kann. Insbesondere das „Live“-Zeichnen wirkt kognitiv unterstützend, da Lernende nachvollziehen können, wie Inhalte Schritt für Schritt entwickelt werden [7]. Die gleichzeitige Präsentation verbaler Erläuterungen und visuell dargestellter Inhalte reduziert die kognitive Belastung, da Sprache, Gestik und Schrift räumlich und zeitlich synchronisiert sind, und fördert so die kognitive Kohärenz [1]. Lightboardvideos werden im Vergleich zu anderen Arten von Lernvideos als motivierender und ansprechender wahrgenommen. Die visuelle Besonderheit und der direkte Blickkontakt tragen wesentlich zur Aufmerksamkeit und zum Engagement der Lernenden bei [8]. Gerade bei der Vermittlung mathematischer Inhalte bieten Lightboardvideos einen klaren didaktischen Mehrwert: Begriffe, Formeln und Zusammenhänge lassen sich nachvollziehbar in einem Tafelbild entwickeln. Dies entspricht den Anforderungen lernförderlicher Schritt-für-Schritt-Erklärungen [9]. Ein Beispiel für ein Lightboardvideo findet sich bei Riedl [10].

## 3 Beschreibung der Lernumgebung

Die digitale Selbstlerneinheit bereitet in sechs Kapiteln zentrale Themen der Differenzial- und Integralrechnung auf, die zum großen Teil im Schulunterricht behandelt werden. Eine ausführliche Beschreibung der Selbstlerneinheit findet sich bei Altieri et al. [11]. Digitale Selbst-

lerneinheiten haben sich als lernförderlich erwiesen [12], weshalb sich deren Weiterentwicklung etwa durch eine Optimierung der didaktischen Gestaltungselemente lohnt.

Im vorliegenden Kurs werden die wichtigsten Inhalte und Konzepte durch 21 interaktive Lightboardvideos (Länge: 4 bis 12 Minuten) erklärt. Mit Hilfe des Moodle-Plugins H5P werden Videosequenzen mit Interaktionen verknüpft, so dass Lernende während der Videos regelmäßig aktiv in den Lernprozess involviert werden, bspw. durch das selbstständige Berechnen von Ableitungen oder das Beantworten von Multiple-Choice-Fragen. Diese Interaktionen dienen der Segmentierung des Lerngegenstands in kleinere Einheiten und ermöglichen es den Lernenden, die Inhalte besser zu verstehen und zu festigen [1]. Die Lernenden werden mit Hilfe anschaulicher Erklärungen durch den Inhalt geführt, wobei wichtige Konzepte graphisch und farblich hervorgehoben werden [1].

Die behandelten Themen werden in allen Kapiteln durch STACK-Aufgaben vertieft. Der Vorteil dieser Aufgaben besteht in ihrer parameterbasierten Randomisierung, die den Lernenden ein beliebig häufiges Üben mit strukturgleichen Aufgaben erlaubt, sowie in ihrem adaptiven Feedback [13] und ihrer möglichen Mehrschrittigkeit [14]. Zur weiteren vertieften Übung erhalten die Lernenden Aufgaben als Worked Examples mit vollständigen oder lückenhaften Lösungen.

## 4 Forschungsfrage

Im Mittelpunkt dieser Untersuchung steht die Frage, wie Studierende das Lernen mit dem Medium Lightboard bewerten. Die Forschungsfrage lautet folglich:

Wie bewerten Studierende das Medium Lightboard in Hinblick auf den Lernprozess?

## 5 Methodik

In diesem Kapitel werden die Durchführung, das Untersuchungsdesign und die Stichprobe beschrieben.

### 5.1 Durchführung und Untersuchungsdesign

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde ein quantitativer Ansatz mit einem Fragebogen gewählt. Im Sommersemester 2024 wurde dazu in einer Vorlesung zur Ingenieurmathematik ein selbst entwickelter Fragebogen zur Bewertung videobasierter Lernangebote durch Studierende mit acht Fragen eingesetzt. Diese Erhebung diente als Voruntersuchung. Basierend auf den Ergebnissen wurde der Fragebogen für das Sommersemester 2025 überarbeitet. Die ursprünglichen acht Fragen wurden sprachlich leicht angepasst, ohne den Inhalt zu verändern. Zusätzlich wurden vier Fragen ergänzt, die didakti-

sche Gestaltungsprinzipien nach Mayer [15] abbilden. Die finalen zwölf Fragen kamen schließlich im Sommersemester 2025 als Fragebogen „Wahrnehmung des Lernprozesses durch das Medium Lightboard“ zum Einsatz. Ein Cronbachs Alpha von  $\alpha = .92$  bestätigt die Reliabilität des konstruierten Erhebungsinstruments. Die Antworten werden auf einer sechsstufigen Likert-Skala von 1 (*stimme überhaupt nicht zu*) bis 6 (*stimme voll und ganz zu*) erfasst und deskriptiv berichtet. Dabei werden die Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben, um zentrale Tendenzen und Streuungen darzustellen. Die Teilnahme war freiwillig und erfolgte anonym über einen Moodle-Kurs.

## 5.2 Stichprobe

Im Sommersemester 2024 nahmen 87 Studierende an der Voruntersuchung teil, von denen  $N_1 = 74$  der Verarbeitung ihrer Daten zustimmten. An der Hauptuntersuchung im Sommersemester 2025 beteiligten sich 65 Studierende, die der Datenverarbeitung zustimmten; aufgrund fehlender Angaben reduzierte sich die Stichprobe auf  $N_2 = 57$ . In beiden Gruppen überwiegen männliche Studierende ( $n_1 = 55$ ;  $n_2 = 47$ ), gefolgt von weiblichen ( $n_1 = 18$ ;  $n_2 = 9$ ) sowie jeweils eine Person mit diversem Geschlecht. Die Altersverteilung konzentrierte sich auf die Gruppe der 19- bis 24-jährigen ( $n_1 = 61$ ;  $n_2 = 47$ ). In der Voruntersuchung waren sieben Personen 18 Jahre oder jünger bzw. sechs zwischen 25 und 29 Jahre alt. In der Hauptuntersuchung entfielen darauf jeweils fünf Personen.

## 6 Ergebnisse

In Tabelle 1 ist ein Überblick über die Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Items des Fragebogens „Wahrnehmung des Lernprozesses durch das Medium Lightboard“ angegeben. Der Mittelwert aller Fragen beträgt  $M = 5.00$  bei einer Standardabweichung von  $SD = 0.73$ .

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichung ( $N_2 = 57$ )

	<i>M</i>	<i>SD</i>
1. Durch Lernvideos habe ich einen passenden Einstieg ins Thema gefunden.	5.05	1.01
2. Die interaktiven Elemente innerhalb des Lightboards haben mich aufmerksam bleiben lassen.	4.79	1.08
3. Durch die interaktiven Elemente in den Lightboardvideos konnte ich neues Wissen direkt überprüfen.	4.86	1.06
4. Lightboardvideos haben durch die face-to-face-Situation meinen Blick gelenkt.	4.56	1.09
5. Die Lightboardvideos habe ich als angemessen lang empfunden.	4.60	1.32

	<i>M</i>	<i>SD</i>
6. Die Lightboardvideos habe ich als angenehm wahrgenommen.	5.09	1.02
7. Das Tafelbild innerhalb der Lightboardvideos wurde nach und nach aufgebaut. Das hat mir die nötige Zeit zum Überlegen gegeben.	5.39	0.82
8. Die Lightboardvideos haben mich im Vergleich zu anderen Lernvideoformaten besser unterstützt.	5.04	1.02
9. Lightboardvideos habe ich als strukturiert aufgebaut empfunden.	5.30	0.84
10. Ich konnte den Inhalten in den Lightboardvideos gut folgen.	5.46	0.85
11. Die Lightboardvideos sind aus meiner Sicht lernförderlich.	5.32	0.87
12. Die Lightboardvideos haben meine Aufmerksamkeit gesteuert.	4.51	1.20

## 7 Diskussion

Die Ergebnisse der Befragung zeigen, dass Lightboardvideos von den Studierenden für ihren Lernprozess als überwiegend positiv bewertet werden (Gesamtmittelwert  $M = 5.00$ ) und sich zur Vermittlung der Fachinhalte in der digitalen Selbstlernereinheit eignen. Besonders positiv bewertet werden die Schritt-für-Schritt-Erklärungen, die Zeit zum Nachvollziehen der Inhalte liefern und somit als lernförderlich eingestuft werden (vgl. Fragen 7, 10 und 11). Zudem wird der strukturierte Aufbau positiv bewertet, der durch das Segmentierungsprinzip und die Kontiguitätsprinzipien realisiert wurde [1]. Gleichzeitig liefern die Rückmeldungen der Studierenden wertvolle Hinweise für Anpassungen. So sollte bei der Gestaltung künftig noch gezielter auf die Steuerung der Aufmerksamkeit und die optimale Länge der Videos geachtet werden (vgl. Fragen 2, 4, 5 und 12). Zusammengefasst sind Lightboardvideos gut geeignet, um komplexe mathematische Inhalte anschaulich und verständlich zu vermitteln, wenn bei ihrer Gestaltung sowohl die Strukturierung der Inhalte als auch der aktive Einbezug der Lernenden berücksichtigt wird.

## 8 Zukünftige Weiterentwicklung: Interaktives Lightboard für die Lehre

Die Nutzung des analogen Lightboards bringt in der Praxis einige Einschränkungen mit sich, insbesondere hinsichtlich der Stiftqualität und der begrenzten Möglichkeiten zur Einblendung von Texten und Grafiken. Eine zukunftsweisende Lösung ist daher der Einsatz eines interaktiven Lightboards, das durch technische Erweiterungen wie digitale Stifte und die einfache Integration multimedialer Inhalte eine deutlich höhere didaktische Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit bietet. Das Kompetenzzentrum Digitale Lehre der OTH Amberg-Weiden plant aktuell die Anschaffung eines solchen Lightboards, um Lehrenden eine noch effizientere und kreativere

Nutzung dieses Lernmediums zu ermöglichen. Damit sollen sowohl asynchrone Lernvideos als auch synchrone

Live-Online-Vorlesungen didaktisch ansprechend und technisch hochwertig realisierbar werden.

---

## Referenzen:

- [1] R. E. Mayer, *Multimedia Learning*, 3. Aufl., Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] T. van Gog, F. Paas, J. J. G. van Merriënboer und P. Witte, “Uncovering the problem-solving process: Cued retrospective reporting versus concurrent and retrospective reporting”, *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Bd. 11, Nr. 4, S. 237-244, Dez. 2005, doi: 10.1037/1076-898X.11.4.237.
- [3] T. N. Höffler und D. Leutner, “Instructional animation versus static pictures: A meta-analysis”, *Learning and Instruction*, Bd. 17, Nr. 6, S. 722-738, Dez. 2007, doi: 10.1016/j.learninstruc.2007.09.013.
- [4] D. Zhang, L. Zhou, R. O. Briggs und J. F. Nunamaker, “Instructional video in e-learning: Assessing the impact of interactive video on learning effectiveness”, *Information & Management*, Bd. 43, Nr. 1, S. 15–27, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.im.2005.01.004.
- [5] S. Bach, L. Vilsmeier, M. Altieri und V. Stephan, “BEYOND H5P – Entwicklung neuer Interaktionsmöglichkeiten für (Mathematik-)Lernvideos”, in *Lernvideos in der Mathematik: Beiträge zur Abschlussstagung des Projektes studiVEMINTvideos der Universität Paderborn und der TH Köln*, M. Liebendörfer, A. Schmitz und R. Biehler, Hrsg., 2024, S. 43-55. [Online]. doi: 10.17170/KOBRA-2024081810686-043
- [6] G. Tulodziecki, B. Herzig und S. Blömeke, *Medienbildung in Schule und Unterricht: Grundlagen und Beispiele*, 2. Aufl., Bad Heilbrunn: Klinkhardt, 2010.
- [7] L. Fiorella und R. E. Mayer, “Effects of observing the instructor draw diagrams on learning from multimedia messages”, *Journal of Educational Psychology*, Bd. 108, Nr. 4, S. 528–546, 2016, doi: 10.1037/edu0000065.
- [8] M. Lubrick, G. Zhou and J. Zhang, “Is the Future Bright? The Potential of Lightboard Videos for Student Achievement and Engagement in Learning”, *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 15(8). doi.10.29333/ejmste/108437
- [10] L. Riedl, *Produktregel* (15. November 2023). Zugriff: 22. April 2025. [Online Video]. Verfügbar: <https://h5p.org/node/1461519>.
- [11] M. Altieri, K. Dechant-Herrera und L. Riedl, „Vorlesungsbegleitende Förderung der Ableitungs- und Integrationsfertigkeiten von Studierenden durch einen digitalen Selbstlernbaustein – Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Abschlusstest und Klausurleistung in einer Mathematikvorlesung an der OTH Amberg-Weiden“, *Forschungsbericht 2026*, OTH Amberg-Weiden, S. 28-33, ISSN: 2365-1997, [Online] verfügbar: [www.oth-aw.de/forschungsbericht](http://www.oth-aw.de/forschungsbericht)
- [12] K. Dechant-Herrera, M. Altieri und S. Bach, „Vergleichende Analyse der Lernleistung zwischen einem digitalen Selbstlernkurs und einer inhaltsgleichen Präsenzeinheit zur Ingenieurmathematik.“ in *Diversität und Digitalität in der Hochschullehre*, T. Witt, C. Herrmann, L. Mrohs, H. Brodel, K. Lindner und I. Maidanjuk, Hrsg., Bielefeld, 2024, S. 117-128. [Online]. doi: 10.1515/9783839469385-009
- [13] J. Knaut, M. Altieri, S. Bach, I. Strobl und K. Dechant, „A theory-based approach of feedback in STACK-based Moodle quizzes taking into account self-regulation and different proficiency of learners“, *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, Bd. 17, Nr. 23, S. 38-55, Dez. 2022. doi: 10.3991/ijet.v17i23.36425
- [14] M. Altieri, J. Horst, M. Kallweit, K. Landefeld und M. Persike, “Multi-step procedures in STACK tasks with adaptive flow control”, in *Contributions to the 3rd International STACK Conference 2020*, Tallinn, Estland, Juli 2020. doi: 10.5281/zenodo.3944786
- [15] R.E. Mayer, L. Fiorella und A. Stull, “Five ways to increase the effectiveness of instructional video”, *Education Technology Research and Development*, Bd. 68, 837-852, Feb. 2020, doi: 10.1007/s11423-020-09749-6.

## KONTAKT



**Prof. Dr. Leonhard Riedl**

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

le.riedl@oth-aw.de



**Katja Dechant-Herrera, M.A., B.Sc.**

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



**Prof. Dr. paed. Dipl.-Math. Mike Altieri**

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

m.altieri@oth-aw.de

# „Die Amberger Zahlen der Ahnenforschung“ = ein genealogischer Gesamtverwandtschaftsindex

## Zusammenfassung

Weiterentwicklung einer semantisch-effizienten Nummerierung der Gesamtverwandtschaft einer Person für genealogische Zwecke. Mithilfe dieser optimierten Nummerierungsmethode, die wir „die Amberger Zahlen der Ahnenforschung“ oder auch kurz nur „die Amberger Zahlen“ nennen, codieren wir jede einzelne verwandte Person, die in einem beliebigen Stammbaum oder einer Ahnentafel einer Familienforschung auftauchen kann, mit einer funktionalen Zahl, die eindeutig ist und gleichzeitig Rückschlüsse auf die jeweilige Verwandtschaftsbeziehung und den Verwandtschaftsgrad zulässt.

## Abstract

Final development of an elegant and efficient numbering system for a person's entire family for any genealogy project. Using this new numbering method, which we call “the Amberg Numbers of Genealogy”, or simply “The Amberg Numbers” for short, we code each individual who may appear in any family tree or pedigree in family research with a functional number that is both unique and allows conclusions to be drawn about the respective family relationship.

## 1 Einleitung & Motivation

Bei der Ahnen- und Familienforschung versucht man meist mit viel Eifer und Ausdauer über Jahre hinweg die eigenen Vorfahren und Verwandten, und dann wiederum deren Vorfahren und Lebensdaten herauszufinden: in alten Kirchenbüchern, Steuerlisten, Urkunden, Familien-Chroniken, Standesämtern, Stammbüchern, Gerichtsakten, alten Fotos, Grabsteinen, Ortsfamilienbüchern, aber auch in modernen web-gestützten Familiendatenbank-anwendungen ... möglicherweise, um eine innerliche Verbindung zu der familiären Vergangenheit und der eigenen „genetischen Herkunft“ und der angeheirateten „affilierten Verwandtschaft“ aufzubauen. Sobald man einen neuen „Urahn“ gefunden hat, ergeben sich so-gleich mindestens zwei neue Ziele: die beiden Elternteile dieses Urahns! Bei diesem scheinbar mindestens ex-ponentiellen Suchraum empfiehlt es sich gleich von Anfang an die gefundenen Informationen systematisch zu katalogisieren oder die Daten in ein EDV-System zu übertragen. Eine besondere Herausforderung dabei: Immer wieder tauchen selbe Vornamen bei gleichen Familien-

namen auf. Auch Geschwister, Cousins und beliebige Seitenverwandte tauchen in den Quellen auf, ohne gleich ihre gegenseitige Verwandtschaftsrelation preiszugeben. Es bleibt dauerhaft spannend und notwendigerweise unvollständig. Da die gemeine Ahnenforschung in den meisten Fällen nur als nebenläufiges Hobby ausgeführt wird, drängen sich immer wieder die Dringlichkeiten des gegenwärtigen Lebens in den Vordergrund und das „Ab-tauchen in die Vergangenheit“ wird oft auf unbestimmte Zeit pausiert. Deshalb ist es ratsam, gleich von Anfang an mit einer eindeutigen Nummerierung und Indexierung der gefundenen Verwandten zu arbeiten. In [1] und [2] haben wir einen ersten Vorschlag für eine solche Bezifferungs-methode vorgestellt. Hier in dieser Veröffentlichung vereinfachen und finalisieren wir nun diesen Entwurf. Ein weiterer, vermutlich kleiner und unscheinbarer Vorteil beim Verwenden von semantischen Nummern ist, dass man ganz im Sinne der ubiquitären Privatsphäre (siehe [3] zum Beispiel) Personendaten, die noch geschützt sind, in Stammbäumen durch die entsprechenden Amberger Zahlen sinntragend ersetzen kann.

Abbildung 1 zeigt eine beispielhafte Verwandtschaftssituation der violett hervorgehobenen Person mit der Bezeichnung „ich“ in der Mitte. Wo sollte man nun beim Nummerieren anfangen? Und anschließend „in welche Richtung weiterzählen“? In alle Richtungen scheint es unendlich und „kreuz und quer“ weitergehen zu können. Versuchen Sie es gerne, einmal eine geordnete Nummerierung der dargestellten Personen zu vergeben. Bedenken Sie nun bei Ihrem Nummerierungsversuch auch, dass später auch an einigen Enden und Ecken neue Verwandte noch dazu kommen könnten: Es können neue Kinder geboren werden, es können neue Ehen geschlossen werden oder es können neue Dokumente auftauchen, die „neue“ Ahnen oder Seitenverwandte offenbaren.

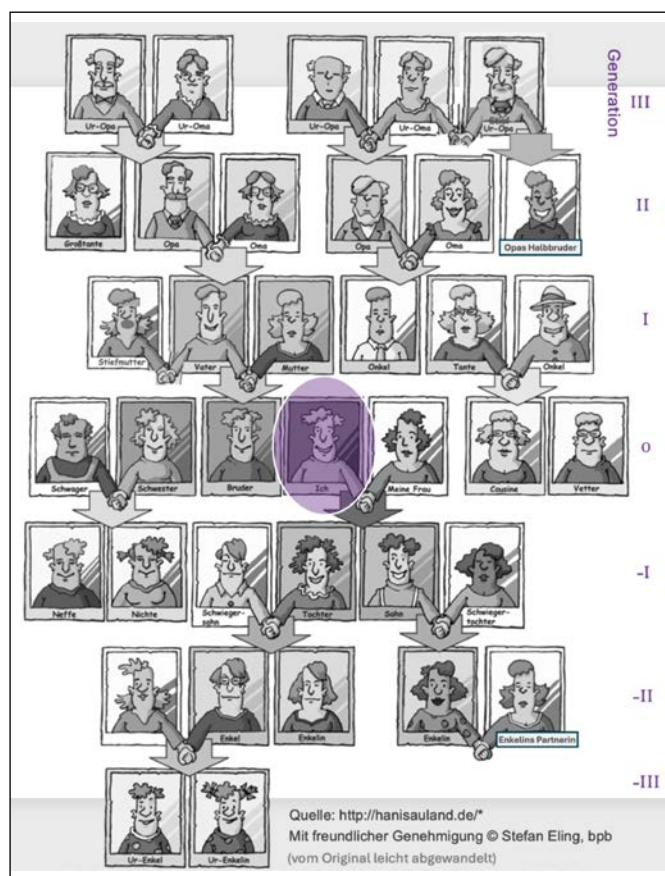


Abbildung 1: Ausschnitt einer beispielhaften Verwandtschaftsverflechtung über 7 Generationen mit Verwandtschaftsbezeichnungen in Bezug auf eine Person „Ego“ in der Mitte, genannt „Ich“ oder „self“ auf Englisch. Original-Quelle der Vorlage: <http://hanisauland.de>, Künstler © Stefan Eling, bpb, Bundeszentrale für Politische Bildung; mit freundlicher Genehmigung; (Abbildung abgewandelt: Heckmann, 2025)

Anmerkung: Auch diese Veröffentlichung im Forschungsbericht 2026 der OTH Amberg-Weiden behandelt, genau wie unsere beiden letzten Beiträge [4] und [5], eine zunächst einmal „un-akademisch erscheinende Fragestellung“; eher eine aus der alltäglichen Anwendungspraxis der Ahnenforschung heraus entstehende Notwendigkeit, die in diesem Fall maximal unter die Kategorie „Hilfswissenschaft“ fallen könnte. Wir versuchen nun mit Techniken der Theoretischen Informatik auch hier einen kleinen, vertiefenden Beitrag für den allgemeinen Alltag zu leisten.

## Anforderungen an „Genealogie-Index-Zahlen“

Ganz im Sinne der „Digital Humanities“, also der zielgerichteten Digitalisierung und Anwendung informatischer Techniken in der geisteswissenschaftlichen Forschung, erscheint es wünschenswert, eine semantisch-eindeutige, gemeinsam nutzbare Repräsentation für Identifikatoren einer Gesamtverwandtschaft, optimiert für den Kontext der Ahnen- und Familienforschung, zu entwickeln. Gleichzeitig wäre es toll, wenn diese „Zahlen“ ein kompaktes, sinntragendes Erscheinungsbild aufzeigen und möglichst sparsam und klein bleiben und derart vergeben werden, dass spätere Nachtragungen „Umgebungs-Zahlen-nah“ eingeordnet werden könnten. Im Ergebnis entstünde eine sprachneutrale Indexierung, einheitlich und kurz, die die Verwandtschaftsbeziehungen konkreter Personen untereinander widerspiegelt.

An diese Wunschliste haben wir uns bei der mehrjährigen Suche nach einer „sinnvollsten“ Nummerierung der Großfamilien-Verwandtschaft orientiert. Auch die Kinder haben mitgeholfen und werden deshalb als Co-Autoren genannt. In diesem Beitrag zum Forschungsbericht 2026 der OTH Amberg-Weiden präsentieren wir nun einen Vorschlag, der sich dieser Anforderungsliste stellen möchte. Wissenschaftlich einzuordnen wäre diese interdisziplinäre Fragestellung vermutlich an der Schnittstelle zwischen den historischen Hilfswissenschaften der Geschichte (denen man die Werkzeuge der Genealogie zuordnet) sowie den Formalen Sprachen der Theoretischen Informatik (da wir einer maximal abzählbar-unendlich großen, komplex-geordneten Menge von Elementen eines Wissens-Graphen eine Struktur-erhaltende, lineare Ordnung der Natürlichen Zahlen zuordnen möchten).

## 2 Die Amberger Verwandtschaftszahlen

### 2.1 Die „Blutsverwandtschaft“

Wir gehen mehrstufig vor: Zunächst überlegen wir uns, welche Hauptgruppen der Verwandtschaft sich auftun und orientieren uns dabei zunächst einmal gedanklich an Lorenz [6], Rösch [7] und Richter [8]. Anschließend „färben“ wir diese nun (zur einprägsameren Visualisierung) möglichst geschickt ein: Von einem abstrakten „EGO“ aus gesehen, gibt es Vorfahren väterlicherseits, die wir **blau** markieren, Vorfahren mütterlicherseits, die wir **rot** markieren, sowie die Kinder der Eltern, die wir **blau + rot = violett** markieren.

Im nächsten Schritt denken wir uns für die angeheirateten Ehepartner **gelb** als Hauptfarbe aus (gelegentlich auch grau) und mischen nun bei deren gemeinsamen Nachfahren jeweils gelb hinzu: Für die Seitenverwandten väterlicherseits ergibt sich also blau + gelb = **grün**, für die Seitenverwandten mütterlicherseits rot + gelb = **orange**, und für die direkten Nachfahren von EGO violett + gelb = **braun**.

Abbildung 2 ordnet diese gefärbten Verwandtschaftsbereiche nun entsprechenden Bereichen zu. In den dargestellten Formen/Kartuschen werden nun Zahlen oder ganze Zahlenbereiche reserviert. Für die Seitenverwandten und Nachfahren vergeben wir Zahlenbereiche mit bestimmten Präfixen, also festen „beginnenden Ziffern“. Die kursiv dargestellten tiefer gesetzten Großbuchstaben  $M_F$  und  $I_V$  stehen als Variablen-Platzhalter für die Durchnummerierung der männlichen (M), weiblichen (F) oder unterspezifiziert-geschlechtlichen (I) Nachfahren, wobei (V) genau fünf „I“ abkürzt im Sinne der römischen Ziffer Fünf = „V“.

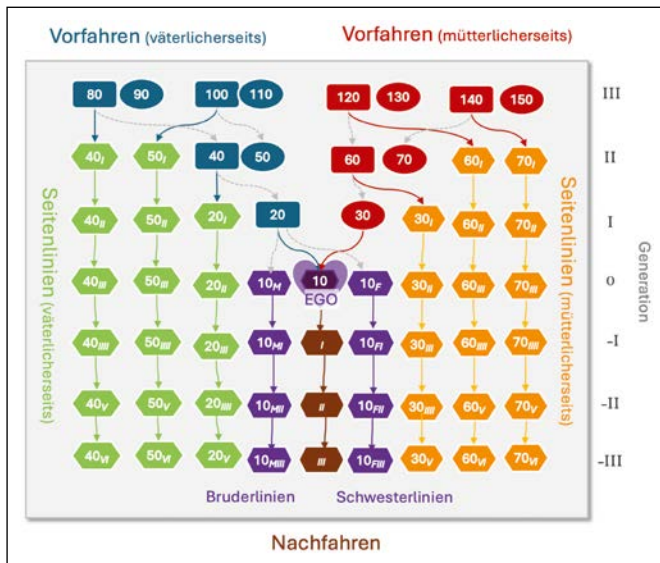


Abbildung 2: Generalisierter Stammbaum der neuen Amberger Verwandtschaftszahlen der Blutsverwandtschaft über sieben Generationen, © Heckmann et. al. 2026, inspiriert von [9], einer Schemadarstellung von 1720 von Johann Christoph Baeurlein

Wir haben in diesem Diagramm sieben Generationen ausgewählt, da dies in etwa dem maximalen Umfang der Verwandtschaft entspricht, die man im Laufe eines langen Lebens kennen lernen könnte: also von den Urgroßeltern bis zu den Ur-Enkeln.

Die gezeigten Zahlenbereiche leiten sich maßgeblich aus zwei bereits wissenschaftlich beschriebenen Nummerierungsmethoden ab: zum einen der Nachfahrennummerierung nach Robert Beichhold [10] von 1929, siehe Abbildung 3, sowie der exponentiellen Vorfahrennummerierung nach Stephan Kekulé von Stradonitz [11] von 1898, siehe Abbildung 4, beziehungsweise von Francis Galton [12] von 1883, (ein Cousin von Charles Darwin).

Robert Beichhold hat eine sehr platzsparende Zählmethode für die Nachfahren eingeführt, indem er einfach die Ziffern aneinanderhängt, zunächst ohne separates Trennsymbol, ab der Zahl 10 klammert er dann die Nummer des direkten Nachfahrens: „(10)“. Wir wenden denselben Trick für die Nummerierung der Nachfahren an, klammern aber bereits ab der Zahl sieben: „1, 2, 3, 4, 5, 6, (7), (8), (9), (10), ...“

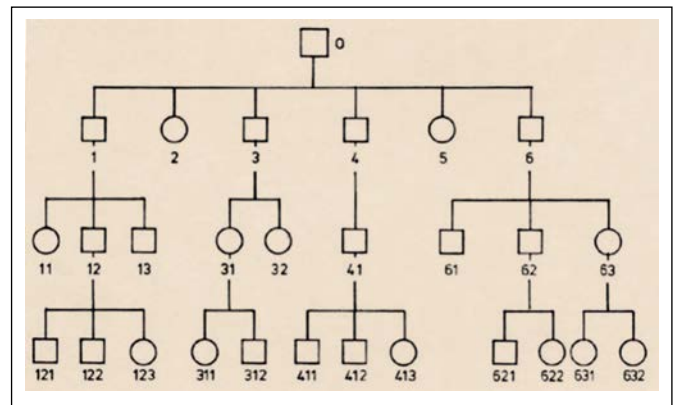


Abbildung 3: Die Nachfahrenzählmethode von Robert Beichhold, 1929, [9], Quelle: [https://www.heraldik-wiki.de/wiki/Robert\\_Beichhold](https://www.heraldik-wiki.de/wiki/Robert_Beichhold), zuletzt abgerufen, 2021

Im Forschungsbericht 2024 der OTH Amberg-Weiden, siehe [4], haben wir bereits eine Notation und formale Sprache für allgemeine Verwandtschaftsbeziehungen definiert und an Beispielen vorgestellt. Dabei ging es um etwas Ähnliches, um Verwandtschaftsgruppen, zum Beispiel die Personengruppe der Großmütter **FIO** oder die Personengruppe der Ur-Enkelöhne, **OIIM**, also um Bezeichner für die Rollen oder Relationen (in einer Graphansicht wären das die Kanten). Im Gegensatz beziehungsweise in Ergänzung dazu geht es in diesem Beitrag um die konkreten Instanzen von einzelnen Personen (in der Graphansicht wären das die Knoten).

Die folgende Abbildung 4 zeigt das Amberger Nummerierungssystem für Vorfahren: EGO beginnt mit der 10. Der Vater verdoppelt auf 20, die Mutter „plus 10“ vom Vater, also 30. Dieses Verfahren wird nun rekursiv angewendet auf alle Vorfahren: „mal 2 & plus 10“. Hieraus ergibt sich eine zentrale und wichtige „Amberg-Zahlen-Eigenschaft“:

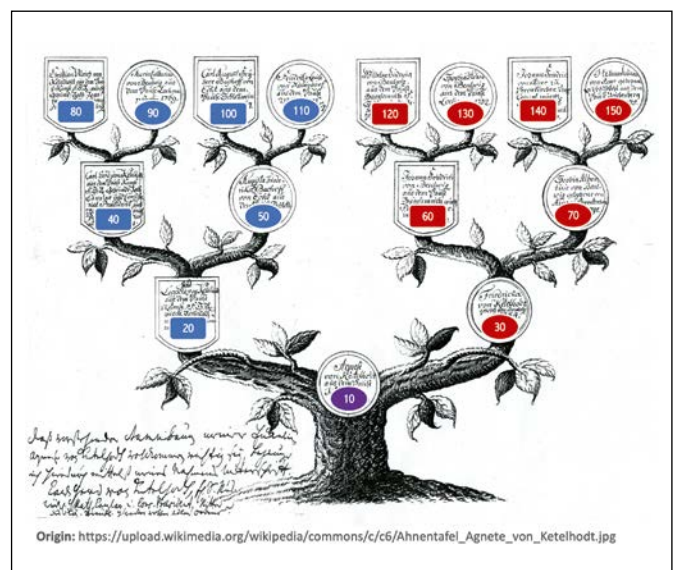


Abbildung 4: Vorfahrennummerierung mit „Amberger Zahlen“, überlagert auf einer Public-Domain-Ahnentafel von 1802, von Agnete von Ketelhodt (als EGO mit der „10“), Original Quelle: Landeshauptarchiv Schwerin, vormals Kloster Dobbertin. Leicht abgewandelt von entsprechender Abbildung in [2]. (Amberg-Zahlen inspiriert von Kekulé, multipliziert mit 10)

Alle Vorfahren und die Ausgangsperson selbst enden auf einer Null und unterscheiden sich dadurch in der letzten Stelle (in der Postfix-Null) von allen anderen Amberger Verwandtschaftszahlen.

Wer bisher für die Vorfahrennummerierung das Kekulé-System benutzt hat, braucht einfach nur an diese Zahlen eine „o“ anzuhängen. Für die Vorfahren haben wir also das Kekulé-System angepasst, für die Nachfahren haben wir das Beichhold-System angepasst, dann bleiben im Rahmen der Blutsverwandtschaft noch die Seitenverwandten übrig, also die Nachfahren gemeinsamer Vorfahren. Auch hier gab es schon historische Nummerierungsvorschläge, wie zum Beispiel von Rösch [7], Richter [8], Heckmann [1], Højrup [13] und anderen. Einen Überblick über die Bezifferung der Gesamtverwandtschaft findet man in [14], wo die einzelnen Ansätze nach einer Gesamtverwandtschafts-Schablone von Chris Rottensteiner miteinander verglichen werden.

Neben der eigenen Blutsverwandtschaft spielt bei der Ahnenforschung insbesondere auch der/die angeheiratete Partner/in bzw. der/die Zeugungspartner/in eine wichtige Rolle. Automatisch erweitert sich die Verwandtschaft dann gleich um eine ganze Schwiegerfamilie.

## 2.2 Die angeheiratete „Affinalverwandtschaft“ = die Schwiegerfamilie

Auf der rechten Seite der Abbildung 5 (des „Amberger-Verwandtschafts-Herz-Diagramms“) erscheint nun die Schwiegerfamilie gespiegelt mit negativen natürlichen Zahlen. Ein großer praktischer Vorteil der reinen Vorzeichen-Spiegelung der Amberger Nummerierung zeigt sich, wenn zwei Ahnenforscher heiraten: Dann braucht keiner der beiden seine bisher vergebenen Amberg-Zahlen neu zu berechnen, lediglich auf das Vorzeichen muss man sich einigen. Auch für die Kinder bleiben die Zahlen stabil: Das erstgeborene Kind bekommt die Ziffer 1, das zweitgeborene die Ziffer 2 und so weiter. Da es ja nie ein „nulltes“ Kind geben kann und die Zahlen der Nachfahren ab dem siebten Kind geklammert werden analog zu Beichhold, besitzen die Amberger Zahlen der Nachfahren nie eine ungeklammerte Null und unterscheiden sich so eindeutig von allen anderen Verwandtschaftszahlen, die immer mindestens eine ungeklammerte Null erhalten.

Das heißt, alleine aufgrund des Aufbaus der Amberg-Zahl kann man direkt ablesen, ob die Person ein Vorfahre ist, ein Nachfahre oder ein Seitenverwandter. Zusätzlich kann man mit einer leichten Berechnung direkt den Verwandtschaftsgrad ausrechnen, ja sogar die tatsächliche konkrete Verwandtschaftsbeziehung kann ausgerechnet werden. Somit bilden die neuen „Amberger Zahlen der Ahnenforschung“ eine sehr kompakte sprachneutrale Interlingua, von der aus dann adaptiv in die jeweilige natürliche Zielsprache hin übersetzt werden kann. Wer weiß zum

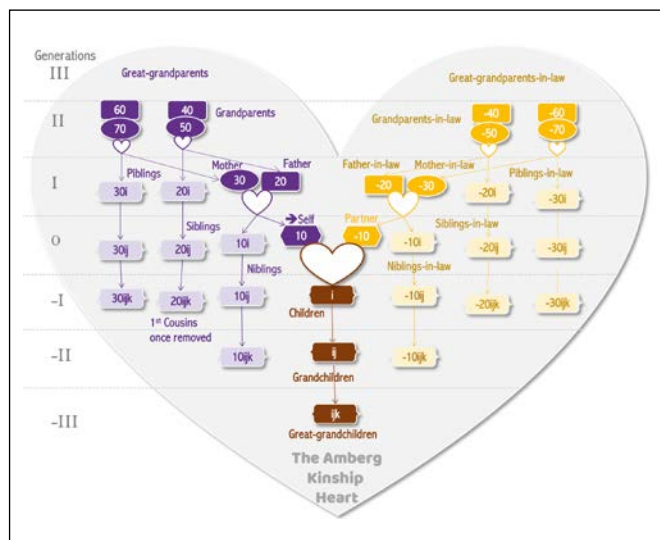


Abbildung 5: Schematische Darstellung der „Amberger-Verwandtschaftszahlen“ der Blutsverwandtschaft, erweitert um die Schwiegerverwandtschaft, (inspiriert vom „Affiliated Kinship Heart“ aus [2]), © Heckmann et. al. 2026: CC BY-NC-ND 4.0, nach <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Beispiel schon als „Nicht-Englisch-Muttersprachler“, was ein „First Cousin Once Removed“ in der entsprechenden deutschen Terminologie genau bedeutet. Siehe [15] für eine ausführliche mehrsprachliche Beschreibung der Verwandtschaftsterminologien. Interessant zu merken: Die „minus 30“ ist die Schwiegermutter.

Zum Abschluss präsentieren wir in Abbildung 6 die „Amberg-Zahlen“ der Großverwandtschaft vom Anfang. Über sieben Generationen hinweg bleiben die Zahlen verhältnismäßig klein und nachvollziehbar. Eine Zahlen-Routine, die bisher noch nicht erwähnt wurde: Die Partnerin von EGO erhält die minus 10, alle anderen eingetragenen Partner und Partnerinnen bekommen die ID des angeheirateten Familienangehörigen plus eine angehängte Acht. Dabei soll die ungeklammerte „8“ symbolisch für die beiden Eheringe stehen, (siehe bereits [1]). Dies ist deshalb problemlos möglich, da der 8. Nachfahre und alle Nachfahren, die eine 8 in der Zählung enthalten würden, ja nach unserer Konvention nur geklammert vorkommen darf. Also 8 versus (8). Also 118 ist die Partnerin von 11, wobei 11(8) das achte Kind von Nummer 11 bezeichnet.

Im letzten Zahlen-System-Entwicklungsschritt haben wir uns nun ein Verfahren überlegt und in [1] beschrieben, wie wir die Klammern letztendlich auch noch durch reine Ziffernfolgen darstellen können, so dass es für jede Amberger Verwandtschaftszahl mit Klammern auch eine eindeutige ungeklammerte gibt.

## 3 Ausblick

In den eigenen Entwicklungsstufen Heckmann@Saarbrücken (2021), Heckmann@Cambridge (2023) und nun mit Heckmann&Dahlen@Amberg (2026) sehen wir die Entwicklung der Nummerierung der Gesamtverwandtschaft

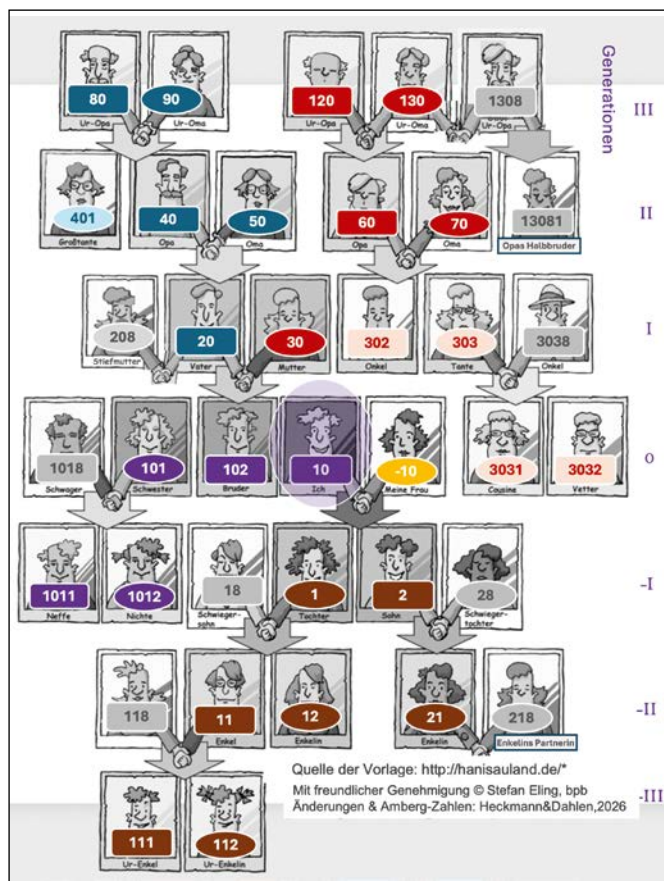


Abbildung 6: Instantiierter Ausschnitt einer beispielhaften Verwandtschaftsverflechtung über 7 Generationen mit Verwandtschaftsbezeichnungen in Bezug auf eine Person, „Ego“ in der Mitte, genannt „ich“, sowie den entsprechenden „Amberg-Zahlen“. Original-Quelle der Vorlage: <http://hanisauland.de/>, Künstler © Stefan Eling, bpb, Bundeszentrale für Politische Bildung; mit freundlicher Genehmigung; (Abbildung abgewandelt & mit Amberg-Zahlen versehen: Heckmann, 2025)

als abgeschlossen. Erst mit den „Amberger Zahlen“, den „Numeri Genealogici Ambergensis“, sind wir nun wirklich zufrieden und erwarten in Zukunft keine Änderungen der bisher definiten Verwandtschaftszahlen, sondern nur noch Erweiterungen in Spezial-Nummerierungs-Situationen hinein, wie zum Beispiel Patchwork-Familien, Zwillinge, Klonen, ...

Ein Ziel wäre es, in Zukunft ein kleines Ökosystem um die Amberg-Zahlen herum zu entwickeln: Werkzeuge, zum Beispiel Umrechnungsalgorithmen und Software-Helfer zum Übersetzen. Desweiteren könnte man versuchen diese neue Gesamtverwandtschafts-Indexierung direkt in existierende Ahnenforschungsprogramme wie „Ahnenblatt, Ancestry, DerStammbaum, Heredis, MacFamilyTree, MyHeritage, ...“ einzubinden, sodass die Software automatisch die Berechnung der Amberg-Zahlen durchführt und anpasst.

#### 4 Zusammenfassung

Wir präsentieren einen modifizierten, finalisierten Nummerierungsvorschlag für die eindeutige, verwandtschaftssemantische Bezifferung der Gesamtverwandtschaft (Consanguinitatis & Affinitatis) in Bezug zu einer zentralen Person, und nennen diesen Ansatz die „Amberger Zahlen der Ahnenforschung“, oder kurz: die „Amberg-Zahlen“.

#### Referenzen:

- [1] „Ein Vorschlag zur Nummerierung der Verwandtschaft mit natürlichen Zahlen“, Dominikus Heckmann, in Saarländische Familienkunde, Band 14/2, Jahrgang LIV 2021, S. 312-321
- [2] “A new Genealogical Ordering System to Denote Consanguinity Types”, Dominikus Heckmann, London 2023, Genealogica & Heraldica XXXV, Reformation, Revolution, Restoration. Proceedings of the 35th International Congress of Genealogical and Heraldic Sciences, Cambridge 2022, edited by Paul A. Fox, S. 81-85
- [3] “Integrating privacy aspects into ubiquitous computing: A basic user interface for personalization”, Dominik Heckmann, Artificial Intelligence in Mobile Systems (AIMS 2003), Workshop in conjunction with Ubi Comp 2003, Seattle, USA, p. 106-110
- [4] Lingua Consanguinitatis Ambergensis – die „Amberger Sprache der Blutsverwandtschaft“, Heckmann, Dominikus, et. al., Forschungsbericht 2024 der OTH Amberg-Weiden, ISSN 2365-1997, S. 85-91
- [5] “ANNO..Ambergensis – eine präzise Notation für unpräzise Datierungen”, Dominikus Heckmann, Christof Rolker, (März 2025), Forschungsbericht 2025 der OTH Amberg-Weiden, ISSN 2365-1997, S. 25-34
- [6] Ottokar Lorenz: Lehrbuch der gesamten wissenschaftlichen Genealogie. Stammbaum und Ahnentafel in ihrer geschichtlichen, sociologischen und naturwissenschaftlichen Bedeutung. Berlin, Verlag von M. Hertz, 1898.
- [7] Siegfried RÖSCH: Über Begriff und Theorie der „Gesamtverwandtschaft“; in: Familie und Volk, 4/1954, S. 97-101.

- [8] Arndt RICHTER: Das „Gesicht der Genealogie“ Über listenmäßige Darstellung von Nachkommenschaften: Struktur und Bezifferung; 2008, ([www.gentalogie.de](http://www.gentalogie.de), zuletzt am 24.09.2021)
- [9] Universitätsbibliothek Freiburg i. Br., Q 4363,g „Manuctio Seu Explicatio Brevis Arboris Consanguinitatis, Et Facillimus Modus Indagandi gradus maximè quoad petendam dispensationem: tam ex Jure Canonico, quam Civili deducta, & in Schemate proposita“, Frankfurt am Main, 1725 [VD18 12289345], S.17
- [10] Robert BEICHHOLD: Ein Vorschlag zur Bezifferung von Nachfahrentafeln und Stammtafeln; Familiengeschichtliche Blätter, 27. Jahrgang, 1929, Heft 9/10, S. 289.
- [11] Stephan KEKULE VON STRADONITZ: Über eine zweckmäßige Bezifferung der Ahnen, in: Vierteljahrsschrift für Wappen-, Siegel- und Familienkunde, Berlin 26/1898, S. 64-72.
- [12] Francis GALTON: “Arithmetic Notation of Kinship”, Nature 28 (1883 Sept.6):435.
- [13] Knut Højrup: “The Knot System - A Numeric Notation of Relationship”, in National Genealogical Society Quarterly USA, vol. 84, no. 2 (June 1996).
- [14] [https://wiki.genealogy.net/Bezifferung\\_Gesamtverwandtschaft](https://wiki.genealogy.net/Bezifferung_Gesamtverwandtschaft) (zuletzt abgerufen am St. Martinstag, 2025)
- [15] Heiko Hungerige: “Englische Verwandtschaftsbezeichnungen: Was ist ein „second cousin twice removed“?” in: Computergenealogie – Magazin für Familienforschung, vol. 35, no. 1 (2020), pp. 12-14.

### **Unterstützung & Danksagung:**

Besten Dank an die aktuelle III0III-Gruppe in Amberg: Tamara Graf, Kevin Paulus, Leonhard Wöllmer, Montell Barbee, Maximilian Lippmann, und Dr. Markus Lommer. Ganz herzlichen Dank auch an Arndt Richter, Heiko Hungerige, Christian Rottensteiner, Dr. Hermann Schadt, und meiner Schwester Dr. Dorothee Maria Heckmann-Pohl. Ein ganz besonderer Dank gilt dem Verein „ASF Familienkunde im Saarland“ insbesondere Roland Geiger und Dr. Jörg Wahrenberg, die diese Neuentwicklung von Anfang an unterstützt haben. Zu guter Letzt: in Erinnerung an meinen Großonkel Alfred Heckmann, der in mir die Freude und Verantwortung der Ahnenforschung geweckt hat.

## KONTAKT



**Prof. Dr.-Ing. Dominikus Heckmann**

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

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

# Untersuchung einer KI-Strategie zur Optimierung der Aerodynamik von Rotorblättern für Kleinwindenergieanlagen

## Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag wird die Leistungssteigerung einer Kleinwindturbine durch eine automatisierte Optimierung der Rotorblattgeometrie vorgestellt. Die optimierte Geometrie wird gefertigt und auf dem Prüfstand für Kleinwindenergieanlagen vermessen. Dabei liefert die Kleinwindturbine eine um bis zu 12 % gesteigerte spezifische elektrische Leistung. Motiviert sind die Untersuchungen durch den Bedarf, automatisierte Optimierungsmethoden zur Verbesserung von Verfahren und Produkten auch in kleinen mittelständischen Unternehmen einzusetzen. In diesem Kontext wird auch die Verwendung von Open-Source-Software in der Strömungssimulation und Optimierung diskutiert.

## Abstract

This article presents the performance improvement of a small wind turbine by means of automated optimization of the rotor blade geometry. The optimized geometry is manufactured and measured on the test bench for small wind turbines. The small wind turbine delivers up to 12% increased specific electrical power. The investigations are motivated by the need to use automated optimization methods to improve processes and products in small and medium-sized enterprises. In this context, the use of open-source software in flow simulation and optimization is also discussed.

## 1 Einleitung

Die Methode der numerischen Strömungssimulation (engl.: Computational Fluid Dynamics, CFD) hat als Auslegungsmethode in vielen Bereichen des Maschinenbaus, der Luft- und Raumfahrt, der Gebäudesimulation, des Wasserbaus, der Elektrotechnik und Mikrometeorologie Einzug gehalten. Aufgrund des hohen Bedarfs an Rechenleistung und spezialisierten Fachleuten hat sich die Methode zunächst in öffentlichen Großforschungseinrichtungen, dann in Großunternehmen und erst in jüngerer Zeit auch in wenigen KMU als Standard etablieren können. Für viele KMU sind jedoch die mit kommerzieller Software verbundenen Lizenzgebühren sowie der Mangel an Fachpersonal mit den erforderlichen Spezialkenntnissen ein Hemmnis, CFD-Methoden im Unternehmen zu nutzen – obwohl dringender Bedarf bestünde.

Ein bewährter Ansatz zur strömungsmechanischen und thermohydraulischen Auslegung von um- bzw. durch-

strömten Komponenten besteht darin, die geometrische Form mit analytisch-empirischen Ingenieurmethoden auszulegen, im CAD-System zu konstruieren und dann mithilfe von CFD-Simulationen im Hinblick auf Funktion und wichtige Designparameter zu überprüfen. Dabei macht selbst ein erfahrener Konstrukteur häufig die Erfahrung, dass sich eine komplizierte dreidimensionale Strömung oft deutlich anders verhält, als es sich der Designer vorgestellt hat. Folglich muss die geometrische Form wieder abgeändert werden und neu simuliert werden, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird. Dieser Entwurfsprozess ist zeit- und ressourcenaufwändig, wengleich doch ein deutlicher Fortschritt zur abschließlichen Anwendung von analytisch-empirischen Methoden und Versuchsdurchführung.

In jüngerer Zeit werden daher verstärkt Methoden entwickelt und eingesetzt, die den Prozess der Optimierung automatisieren sollen. Dem technikinteressierten Publikum sind vor allem die kreativen aerodynamischen De-

signs im Automobilrennsport (z. B. in Formel 1, Formel E und IndyCar Series) aufgefallen. Die Formgebung der dort verwendeten aerodynamischen Hilfsmittel basiert überwiegend auf der Anwendung von gekoppelten CFD-Optimierungsmethoden.

Je nach Komplexität des Optimierungsproblems und der zugrundeliegenden Numerik und Physik können sich hohe Anforderungen an den Aufbau von Simulation und Optimierung sowie ein hoher Rechenaufwand ergeben. Die automatisierte Durchführung von hunderten Simulationen führt auch unter Verwendung moderner Hochleistungsrechner oft noch zu Rechenzeiten von mehreren Monaten.

Um die beschriebenen Methoden auch für KMU umzusetzen, müssen zunächst angehende Ingenieurinnen und Ingenieure insbesondere im Maschinen- und Fahrzeugbau bereits im Studium mit den Grundlagen der numerischen Strömungssimulation vertraut gemacht werden. Weiterhin müssen die Potenziale von Open-Source-Software zur Strömungssimulation (z. B. OpenFOAM [1] oder SU2 [2]) aufgezeigt werden, die in ihrer Leistungsfähigkeit und Präzision kommerzieller Software nicht nachsteht. Insbesondere OpenFOAM ist weit verbreitet und wird von einer großen Community aus Industrie und Forschung aktiv weiterentwickelt.

Neben der Kostenersparnis liegt ein weiterer entscheidender Vorteil des offenen Quellcodes in der Transparenz – dem Anwender ist es möglich, den Lösungsprozess nachzuvollziehen, zu modifizieren und auch neue Methoden zu entwickeln. Allerdings stellt die nicht vorhandene graphische Benutzeroberfläche und die oft nur spärliche Dokumentation gerade für Einsteiger oft eine besondere Hürde dar.

Ziel dieses anwendungsorientierten Forschungsvorhabens ist es, modernste Entwurfsmethoden der Strömungsmechanik auch KMU zugänglich zu machen und damit deren Wettbewerbsfähigkeit zu erhöhen.

In dem vorliegenden Beitrag wird dazu ein automatisierter CFD-basierter Optimierungsansatz vorgestellt und beispielhaft zur Leistungssteigerung einer Rotorblattgeometrie einer Kleinwindenergieanlage (KWEA) eingesetzt. Die optimierten Rotorblätter werden rekonstruiert, gefertigt und am Prüfstand für Kleinwindenergieanlagen der OTH Amberg-Weiden vermessen.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Ausgangsgeometrie

Als Basis für die Optimierung wird die KWEA AirForce 1 des britischen Herstellers FuturEnergy Ltd. ausgewählt. Bei einer Blattanzahl von 5, einem Rotordurchmesser von 1,75 m und einem TSR (Schnellaufzahl, engl.: Tip Speed

Ratio) von 4,5 erreicht sie einen Leistungsbeiwert von 0,435. Die mechanische Nennleistung der Turbine beträgt bei Nennbedingungen (Windgeschwindigkeit  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , Luftdichte  $1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , Drehzahl  $491,1 \text{ min}^{-1}$ ) 628 W. Mit Profilvernoldszahlen von 81 500 (Nabe) bis 130 500 (Blattspitze) liegt die Umströmung dabei im Low-Reynolds-Bereich. Eine Nachrechnung mithilfe der Software QBlade [3] zeigt, dass der Rotor nach der Blattelementimpulstheorie (engl.: Blade Element Momentum Theory, BEM) ausgelegt ist. Details zur Überprüfung und Nachrechnung sind in den Forschungsberichten der OTH AW der Jahre 2018 [4] und 2022 [5] beschrieben.

Eine wesentliche Einschränkung der BEM besteht darin, dass die einzelnen Blattabschnitte so behandelt werden, als hätten sie keinerlei Einfluss aufeinander. Dreidimensionale Effekte können dabei nur mithilfe von Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Da CFD-Methoden die dreidimensionale Strömung erfassen können, bieten sie die Grundlage zur Optimierung des Designs.

### 2.2 Optimierung

Für die Optimierung wird eine Kopplung von Freiformdeformation (engl.: Free Form Deformation, FFD), CFD und genetischem Algorithmus entwickelt. Genetische Algorithmen sind Verfahren, die die Prinzipien der natürlichen Selektion nachahmen (vgl. [6]), um eine Optimierung von Designparametern hinsichtlich einer definierten Zielfunktion zu erreichen.

Die Geometrie der Originalturbine wird mithilfe der FFD modifiziert, wobei der Rotordurchmesser der Ausgangsgeometrie beibehalten wird. Bei der FFD wird ein quaderförmiges Gitter um das Oberflächennetzmodell der Ausgangsgeometrie gelegt, durch Verschiebung der Stützpunkte des Gitters wird eine Deformation der Geometrie erreicht, vgl. [7]. Abbildung 1 zeigt eine FFD am Beispiel der Außenform eines PKW. Die Verschiebungsvektoren der Stützpunkte, die Ausmaß und Richtung der Deformation bestimmen, stellen die Designparameter, im genetischen Algorithmus die Chromosomen, dar. Die Optimierung wird mit einer Population zufällig generierter Sätze von Verschiebungsvektoren initialisiert.

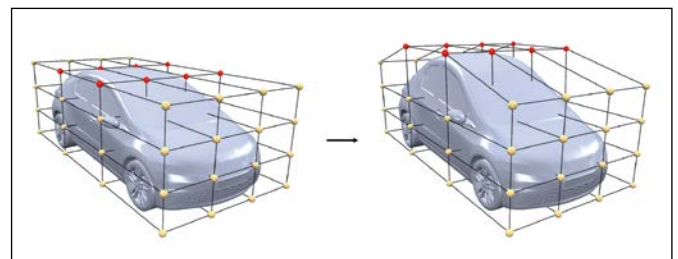


Abbildung 1: Freiformdeformation am Beispiel der Außenform eines PKW, modifiziert nach [7].

Für die automatisierten CFD-Simulationen wird eine Modellierung gewählt, die hinreichend genaue Ergebnis-

se liefern soll und bei minimalem Rechenaufwand maximal robust ist. Es werden Massen- und Impulserhaltungsgleichungen in drei Dimensionen und inkompressibler Form anhand der Finite-Volumen-Methode (FVM) diskretisiert und mithilfe des SIMPLE-Algorithmus [8] stationär gelöst. Zur Modellierung des rotierenden Strömungssystems wird das Rechenggebiet in einem mitrotierenden, stationären Bezugssystem gelöst; Coriolis- und Zentrifugalanteile treten als Quellterme auf, die Rotor-Stator-Interaktion wird über gemittelte Übergänge erfasst (MRF-Ansatz, engl.: Multiple Reference Frames). Zur weiteren Verringerung der Rechenzeit wird nur ein Rotorblatt in einem 72°-Kreissektor simuliert, an den sektorbegrenzenden Flächen werden zyklische Randbedingungen gesetzt.

Nach Erreichen eines Abbruchkriteriums (hier Residuen und Änderung des Drehmoments) wird jede Simulation automatisch beendet; das Drehmoment jedes Individuums wird errechnet. Sind alle Simulationen einer Population abgeschlossen, werden sie anhand der Zielfunktion (Maximierung des Drehmoments), im Kontext genetischer Algorithmen auch Fitnessfunktion genannt, evaluiert. Die Individuen mit der höchsten Fitness, d. h. dem höchsten Drehmoment, werden ausgewählt, um Nachkommen zu erzeugen (Selektion). Die ausgewählten Individuen

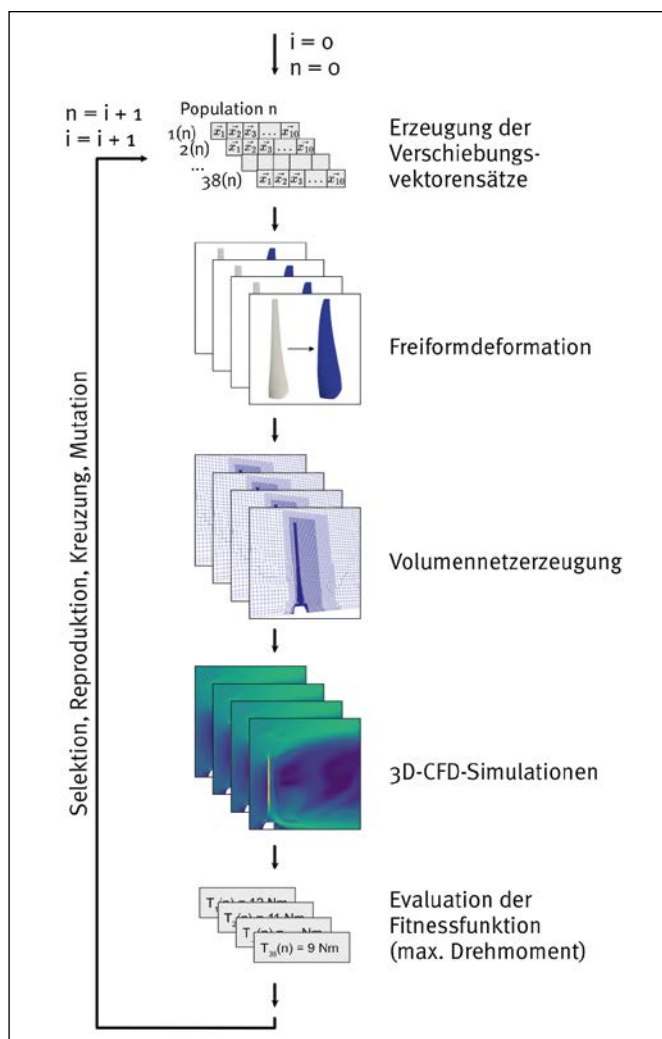


Abbildung 2: Ablauf des Optimierungsprozesses.

werden kombiniert, um neue Verschiebungsvektorensätze zu erzeugen (Kreuzung). Außerdem werden kleine Änderungen an den neuen Verschiebungsvektoren vorgenommen, um Vielfalt zu schaffen (Mutation). Es entsteht die Population einer neuen Generation, für deren Individuen wieder Geometrien deformiert, vernetzt und simuliert werden. Der Prozess wird wiederholt, bis sich eine Konvergenz hinsichtlich des erreichten Drehmoments einstellt. Diese Art der kontinuierlichen Anpassung führt in der Natur zu Organismen, die bestmöglich an die vorherrschenden Lebensbedingungen angepasst sind. Bezogen auf die Optimierung von Designparametern entsteht also ein Satz von Designparametern, der die Zielfunktion bestmöglich erfüllt. Eine Population besteht in der vorliegenden Arbeit aus 38 Individuen; es entstehen also pro Generation 38 verschiedene Geometrien, die automatisiert vernetzt und unter Nennbedingungen der Ausgangsturbine simuliert werden. Abbildung 2 zeigt den Ablauf des gekoppelten automatisierten Optimierungsprozesses. Zum Vergleich wird mit der kommerziellen CFD-Software STAR-CCM+ eine Optimierung anhand der Adjoint-Methode (vgl. [9]) durchgeführt.

### 2.3 Nachrechnung der optimierten Geometrien

Da die Simulationen für die Optimierungen nach Aspekten der Effizienz aufgebaut sind, werden ausgewählte Varianten mit einem Simulationsaufbau von höherem Detaillierungsgrad nachgerechnet. Die Ergebnisse der Nachrechnung werden den Ergebnissen aus den Optimierungen gegenübergestellt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Simulationsparameter der Optimierungen und Nachrechnungen.

### 2.4 Experimentelle Überprüfung

Auf Basis der aus den Optimierungen erhaltenen Oberflächennetzmodelle werden mit der CAD-Software PTC Creo Volumenkörper rekonstruiert. Für die Validierung am Prüfstand werden zwei optimierte Varianten zur Fertigung ausgewählt. Die KWEA wird mit den originalen und den optimierten Rotorblättern unter vergleichbaren Bedingungen am Prüfstand für KWEA vermessen. Die Leistung des Generators wird im Maximum Power Point an der elektronischen Last gemessen. Der Prüfstand und die Details zur Auswertung sind in [4] und [5] beschrieben.

## 3 Ergebnisse

Die KI-Optimierung generiert bereits in der zweiten Generation (Simulationen #39 bis #77) Geometrien mit prognostizierten Drehmomenten von über 14 Nm. Nach etwa sechs Generationen stellt sich eine Konvergenz gegen Werte von etwa 14,5 Nm ein, wobei Mutationen weiterhin für Ausreißer sorgen. Nach 718 Simulationen (entspricht ebenso vielen Geometrien) wird die Optimierung beendet. Die Nachrechnung verschiedener optimierter Geo-

Tabelle 1: Parameter der CFD-Simulationen

Eigenschaft/Parameter	KI-Optimierung	Adjoint-Optimierung	Nachrechnung
Rechenbereich	Sektor (1 Rotorblatt)	Sektor (1 Rotorblatt)	Volle Geometrie (5 Rotorblätter)
Methode	SIMPLE, MRF	block-coupled, MRF	SIMPLE, MRF
Gleichungsdiskretisierung	FVM	FVM	FVM
Turbulenzmodellierung	RANS (k- $\omega$ -SST)	RANS (Spalart-Allmaras)	RANS (Spalart-Allmaras)
Wandbehandlung	High-Reynolds	Low-Reynolds	Low-Reynolds
Zellzahl	ca. $2 \cdot 10^6$	ca. $16 \cdot 10^6$	ca. $16 \cdot 10^6$
Turbulenzintensität am Einlass	0,5 %	0,5 %	0,5 %
Verwendete Software	OpenFOAM [1], Dakota [10], pyGeM [11]	STAR-CCM+	STAR-CCM+

metrien bestätigt das Drehmoment mit Differenzen von ca.  $-1,4$  bis  $0,5$  Nm. Die Geometrie #618 liefert in der Nachrechnung ein Drehmoment von  $14,04$  Nm, was einer Erhöhung von  $23,7$  % gegenüber der Ausgangsturbine entspricht. Die Geometrie aus der Adjoint-Optimierung weist gemäß Nachrechnung ein Drehmoment von  $14,38$  Nm auf.

Die Geometrie #618 aus der KI-Optimierung und die Adjoint-Variante werden zur Fertigung ausgewählt und im CAD-System rekonstruiert. Abbildung 3 zeigt die Geometrien mit Blattansichten. Die Geometrie aus der Adjoint-Optimierung ist in ihrer Erscheinungsform der Ausgangsgeometrie sehr ähnlich, wohingegen die Geometrie #618 verlängerte Profilsehnen und eine auffällige Krümmung hin zur Blattspitze aufweist. Die Rotorblätter sind aus ABS gefräst und durch Schleifen endbearbeitet.

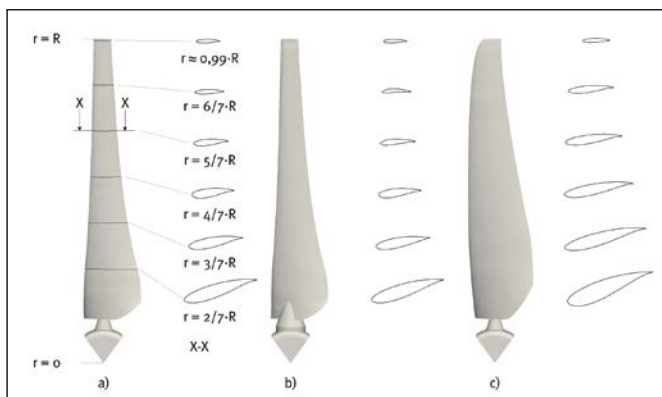


Abbildung 3: a) Ausgangsgeometrie AirForce 1, b) Geometrie aus Adjoint-Optimierung, c) Geometrie #618.

Bei der Vermessung auf dem Prüfstand zeigt sich für die Geometrie #618 über die gesamte Leistungskennlinie hinweg eine erhöhte Leistung gegenüber der Originalturbine. Der Zugewinn an spezifischer Leistung (elektrische Leistung am Generator bezogen auf die Luftdichte) beträgt bis zu  $26 \text{ W} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ; die Drehmomentsteigerung liegt je nach Betriebspunkt zwischen ca.  $2$  und  $12$  %. Die Geometrie aus der Adjoint-Optimierung läuft erst bei einer effektiven Windgeschwindigkeit von etwa  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  an,

liefert dann bis ca.  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  relative Leistungssteigerungen von ungefähr  $1,5$  bis  $7$  %. Bei der höchsten Windgeschwindigkeit erzeugt sie eine geringfügig geringere Leistung als die Originalturbine. Abbildung 4 zeigt die relative Leistungsänderung der optimierten Varianten gegenüber der Ausgangsgeometrie.

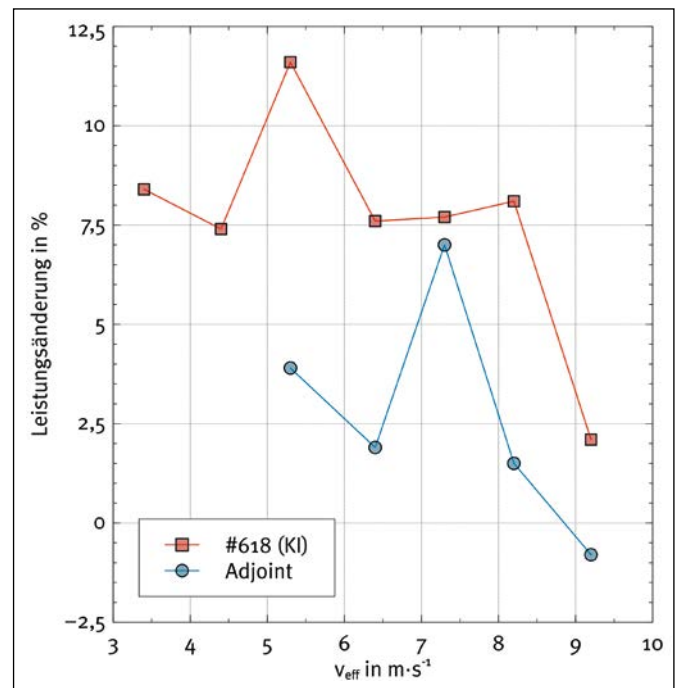


Abbildung 4: Relative Leistungsänderung bezüglich der Originalturbine bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Optimierungsmethode kann für eine Vielzahl nichtlinearer Probleme verwendet werden, kann in großen Suchräumen globale Optima identifizieren, jedoch auch hohen Rechenaufwand mit sich bringen. Die vorgestellte Kopplung aus FFD, CFD und genetischem Algorithmus bietet den Vorteil, dass die CFD-Simulation lediglich die Zielgröße für eine untersuchte Variante zurückgibt – damit sind beliebige physikalische Modellierungen einsetzbar und es können anstelle der Geome-

trie z. B auch Betriebsparameter oder Modellkonstanten optimiert werden.

Der Aufbau der Optimierung fordert einen relativ hohen Aufwand, bietet jedoch zahlreiche Möglichkeiten, die für das vorliegende Problem angemessene Optimierungsmethode umzusetzen. Im Hinblick auf die Anwendung von modernen Optimierungsmethoden in KMU birgt sie das Potenzial für automatisierte Lösungen, die für das jeweilige Produkt bzw. Verfahren im Unternehmen maßgeschneidert werden können. Hierfür sind Ausbau und Pflege des Wissenstransfers zwischen Hochschule und Unternehmen und eine Lehre, die die Vermittlung fundierter Grundlagen und aktuelle Erkenntnisse aus der Forschung vereint, essenziell.

Hinsichtlich der Leistungssteigerung der Kleinwindturbinen ergibt sich weiterer Forschungsbedarf: Während die

Optimierung der Rotorblattgeometrie mit uniformer Anströmung vorgenommen wird, ist die Turbine auf dem Prüfstand konzeptbedingt mit nicht-uniformer Strömung beaufschlagt. Trotz des Umstands, dass die Kleinwindturbinen also für andere Randbedingungen optimiert ist, erzeugt sie auf dem Prüfstand eine höhere Leistung als die Ausgangswindturbinen. Für einen systematischen Abgleich der Simulation und Optimierung ist es erforderlich, Versuchsbedingungen zu schaffen, die auch im Hinblick auf die Anströmverhältnisse kongruent in der Simulation abbildbar sind – unter anderem zu diesem Zweck befindet sich an der OTH AW derzeit ein Prüfstand im Aufbau. Der neue Versuchsaufbau ermöglicht die Messung der Geschwindigkeitsfelder stromauf- und abwärts einer Modellturbinen mithilfe der Particle Image Velocimetry, die im Labor für Strömungsmechanik bereits zur Messung von Wasserströmungen erfolgreich eingesetzt wurde [12].

---

## Referenzen:

- [1] H. G. Weller, G. Tabor, H. Jasak, und C. Fureby, "A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques", *Computers in Physics*, vol. 12, no. 6, pp. 620-631, Nov. 1998.
- [2] F. Palacios et al., "Stanford University Unstructured (SU2): Analysis and Design Technology for Turbulent Flows", in *52nd Aerospace Sciences Meeting*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [3] D. Marten, J. Saverin, R. Behrens de Luna und S. Perez-Becker, "Blade Element Momentum Method", QBlade Documentation, 2024. [Online]. Verfügbar: <https://docs.qblade.org/src/theory/aerodynamics/bem/bem.html>
- [4] S. Beer, D. Hummel und P. Stüber, "Vermessung und Strömungssimulation von Kleinwindenergieanlagen", *Forschungsbericht*, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, pp. 43-47, Feb. 2018. ISSN: 2365-1997.
- [5] S. Beer, "Optimierung der Energiewandlungskette von Kleinwindenergieanlagen (KWEA)", *Forschungsbericht*, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, pp. 29-34, Mar. 2022. ISSN: 2365-1997.
- [6] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, 30. print. Boston: Addison-Wesley, 2012.
- [7] D. Sieger, S. Menzel, und M. Botsch, "A Comprehensive Comparison of Shape Deformation Methods in Evolutionary Design Optimization", Presented at the International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
- [8] S. V. Patankar und D. B. Spalding, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, no. 10, pp. 1787-1806, Oct. 1972.
- [9] C. Othmer, "A continuous adjoint formulation for the computation of topological and surface sensitivities of ducted flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 58, no. 8, pp. 861-877, 2008.
- [10] B. M. Adams et al., *Dakota 6.21.0 documentation*. Technical Report SAND2024-154920, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, November 2024.
- [11] M. Tezzele, N. Demo, A. Mola, and G. Rozza, "PyGeM: Python Geometrical Morphing", *Software Impacts*, vol. 7, p. 100047, Feb. 2021.
- [12] D. Hummel, "Numerische und experimentelle Untersuchungen zum konjugierten Wärmeübergang beim Schmelzen von makroverkapselten Phasenwechselmaterialien", *Dissertation*, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen, 2023. [Online]. Verfügbar: <https://open.fau.de/handle/openfau/23648>

**Projektpartner:**  
polyphysik GmbH, Rieden

**Fördergeber:**  
Technologie- und Wissenschaftsnetzwerk Oberpfalz (TWO)

gefördert durch: Bayerisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst 

## 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



**Dr.-Ing. Daniel Hummel**

polyphysik GmbH  
Hammerbergstraße 3  
92286 Rieden

info@polyphysik.org



**Patrick Mlotzek, M.Eng.**

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

p.mlotzek@oth-aw.de



**Peter Sander, M.Sc.**

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

p.sander@oth-aw.de

# Development of a Floating Turbine Coil Pump for Irrigation Purposes in Emerging Countries

## Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die technische Machbarkeit und wirtschaftliche Rentabilität einer schwimmenden Turbinen-Spulenpumpe (FTCP) als dezentrale Bewässerungslösung für Regionen mit begrenztem Zugang zu Elektrizität. Basierend auf den Prinzipien der Wirtz-Pumpe nutzt die FTCP die kinetische Energie fließenden Wassers, um ohne externe Energiequellen zu arbeiten. Eine theoretische Analyse ergab die Leistungsparameter Eintauchverhältnis, Anzahl der Schlauchwindungen, Trommel- und Turbinendurchmesser, Drehzahl und Schlauchdurchmesser sowie den Schlüsselparameter Strömungsgeschwindigkeit. Der Einfluss dieser Parameter wurde anhand von 186 Messungen an einer speziell angefertigten Testvorrichtung untersucht. Für verschiedene Konfigurationen wurden die Durchflussrate und die maximal erreichbare Förderhöhe gemessen. Aus diesen und weiteren Messungen wurden die Energieeffizienz und der volumetrische Wirkungsgrad berechnet und der Einfluss der Führung der stationären Förderleitung untersucht. Anschließend wurde ein funktionsfähiger FTCP-Prototyp aus potenziell lokal verfügbaren Materialien gebaut und unter realen Bedingungen im Fluss Vils getestet. Die Pumpe erreichte eine Förderleistung von  $1,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  bei einer Förderhöhe von 1,7 m, was den Nachweis der Funktionsfähigkeit erbrachte.

Ein wirtschaftlicher Vergleich mit herkömmlichen Tauchpumpen ergab, dass FTCPs in industrialisierten Gebieten wie Deutschland nicht wettbewerbsfähig sind. In Entwicklungsregionen bieten sie jedoch aufgrund ihrer Einfachheit, Reparatur-Freundlichkeit und Unabhängigkeit von der Netzinfrastruktur deutliche Vorteile. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass FTCPs als kostengünstige, lokal handhabbare Bewässerungslösung in abgelegenen Gebieten dienen könnten, sofern geeignete Fließgewässer vorhanden sind.

## Abstract

This thesis investigates the technical feasibility and economic viability of a Floating Turbine Coil Pump (FTCP) as a decentralized irrigation solution for regions with limited access to electricity. Based on the principles of the Wirtz pump, the FTCP utilizes the kinetic energy of flowing water to operate without external power sources. A theoretical analysis presented the performance parameters submerged ratio, number of hose coils, drum and turbine diameter, rotational speed, and hose diameter as well as the key parameter flow velocity. The influence of these parameters were examined through 186 measurements on a custom-built test apparatus. Flow rate and maximum achievable pump head were measured for different configurations. Energy efficiency and volumetric efficiency were calculated from these and other measurements, and the influence of the routing of the stationary delivery hose was investigated. Subsequently, a functional FTCP prototype was constructed using potentially locally available materials and tested under real-world conditions in the river Vils. The pump achieved a flow rate of  $1.2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  at a pump head of 1.7 m, confirming proof of concept.

An economic comparison with conventional submersible pumps revealed that FTCPs are not competitive in industrialized contexts such as Germany. However, in developing regions, their simplicity, repairability, and independence from grid infrastructure offer distinct advantages. The findings suggest that FTCPs could serve as a low-cost, locally maintainable irrigation solution in remote areas, provided that suitable watercourses are available.

## 1 The Coil Pump – Operating Principle and Possible Application

A floating turbine coil pump (FTCP) consists of a flexible hose wound in several coils around or inside a cylindrical drum as displayed in Figure 1. One end of the hose is open (scoop), the other is connected to a rotary coupling. This coupling links to the stationary delivery pipe. If the drum is rotated e.g. by a water wheel or a propeller turbine as shown in Figure 1, water and air are alternately scooped in by the inlet. The submerged ratio (SR) defines the area of the drum submerged divided by the drums complete area. This theoretically results in a water flow of the SR multiplied with the rotational speed.

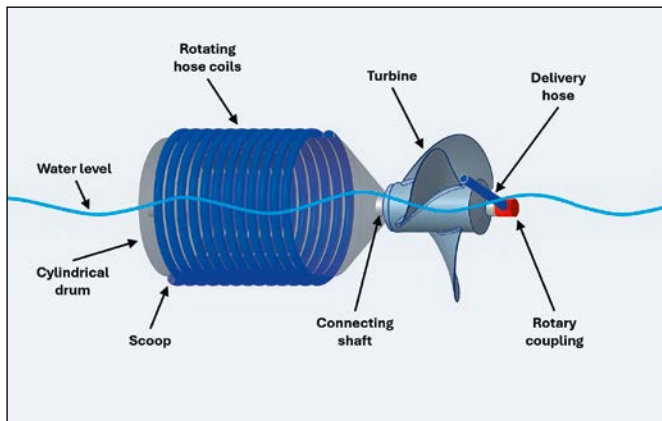


Figure 1: Schematic representation of an FTCP (adapted from [1], modified by the authors) – flow direction from right to left

Each coil of the pump acts as a water column manometer as displayed in Figure 2. The total pressure difference or head ( $H_T - H_A$ ) between the outlet (right) and the inlet (left) is just the sum of all differential heads  $h_i$  of the  $i$  coils. Assuming a SR of 50 % and neglecting the compressibility of the air, the maximum achievable head would be given as the number of windings  $n$  times the diameter of the drum. However, as the delivery pipe leads to a higher location than the water level, the air plugs are compressed due to the rising pressure and the resulting differential head of coil  $n$  is greater than that of coil 1.

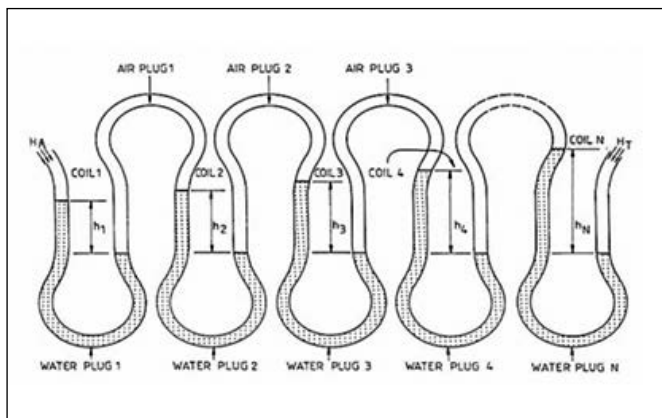


Figure 2: Simplified i.e. unwound display of the hose of a coil pump [2]

So, in contrast to an Archimedes Screw, the coil pump is able to build up an actual pressure difference and is therefore able to convey water higher than its own diameter. Most likely, the spiral pump, on which the coil pump is based, was invented by H.A. Wirtz 1746, a pewterer of Zurich in Switzerland [3]. The FTCP is a very simple device that can easily be manufactured out of semi-finished products available all over the world. Driven directly by the flow of a water body it does not require another power source and can work autonomously and continuously [4]. Thus, it appears to be predestined for irrigation purposes in emerging countries.

The goal of the presented research was to design and experimentally investigate the coil pump and its implementation as an FTCP using simple, cheap and easily available materials.

## 2 Development of and Experiments on the Test Apparatus

To better understand the behaviour of coil pumps, the test setup shown in Figure 3 was designed and manufactured mainly from steel. It allows various configurations of the pump in terms of number of coils, drum diameter and hose diameter. The manual drive with a bicycle crank allows different rotational speeds to be tested. The behaviour of the pump at different pump heads was investigated.

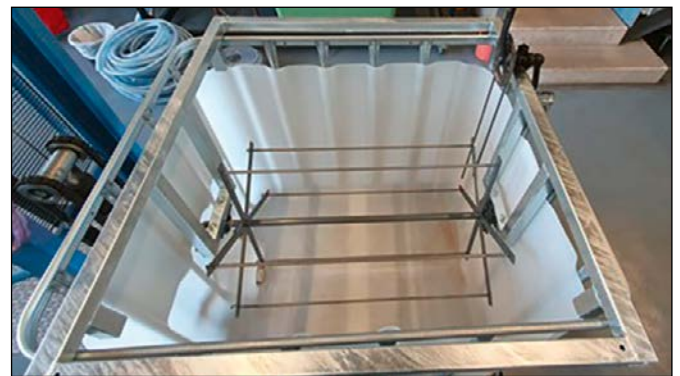


Figure 3: Test apparatus with detached drive mechanism

In 186 measurements with different coil pump configurations, flow rates and maximum pump heads were measured directly, and measurements were taken to determine energy and volumetric efficiency. In addition, the behaviour of the pump was observed qualitatively. The measurement results confirmed the correlations expected from theory [5,6].

Thus, with the configuration otherwise unchanged, the flow rate increased with increasing drum and hose diameters and with higher rotational speeds. The number of coils or the pump head, on the other hand, had no measurable effect on the flow rate. The highest flow rate of  $6.4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  was measured at a rotational speed of

20 rpm, the highest rotational speed tested, with a 3/4" hose and a drum diameter of 57 cm.

In terms of maximum pump head, it was found that this increases with larger drum diameters or the usage of more rotating hose coils. It could not be conclusively proven that the maximum pump head decreases with increasing rotational speed. Since the measurements for the maximum pump head were only carried out with one hose diameter, no analysis could be made regarding a correlation. The maximum pump head measured with this 1/2" hose was 7.30 m and was achieved in a configuration with a drum diameter of 57 cm, 25 coils, and a rotational speed of 6 rpm.

The results of the determination of energy efficiency are only partially reliable due to the suboptimal design of the test apparatus. Nevertheless, it was demonstrated that the pump can operate energy efficient at up to around 65 %. For volumetric efficiency, the maximum amount of fluid that the pump could scoop in during the observation period through its rotational movement was considered and compared to the amount of water pumped during the same period. The results from measurements and calculations range around 60 %, which roughly corresponds to the SR.

### 3 Floating Turbine Coil Pump – Proof of Concept

The output of an FTCP is largely dependent on the flow velocity of the water body used — i.e., proportional to the third power of the velocity. Other significant factors include the area and SR of the turbine, as well as the shape of the turbine. Figure 4 depicts the fabricated pump in its final form on a trolley.



Figure 4: Final version of the FTCP

For the manufacturing of this pump, the lid was removed from a 220-litre plastic rain barrel, and a four-bladed turbine was cut into the bottom. Inside, a 3/4" hose was wound into 25 coils and secured. The stationary delivery hose was attached to a rotary coupling via a hole in the centre of the turbine. Motorcycle inner tubes served as floats. To generate additional torque in the slow running river Vils, additional turbine blades manufactured from aluminium sheet were attached at the outside of the turbine. Despite the low flow velocity in the Vils of around  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the pump was able to deliver 5 l of water to a head of 1.7 m in a measurement period of 253 s. This corresponds to a flow rate of  $1.2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  and proved that the technical feasibility of the FTCP concept. It should be noted that, as the design is to be replicated by non-experts, the turbine blades were made by hand without precise adjustments to the flow characteristics.

### 4 Economic Aspects

A brief economic analysis showed that the potential of FTCPs in developed countries such as Germany is limited due to the availability of cheaper solar-powered submersible pumps that can deliver significantly more water. A similar comparison could not be made for Mozambique, which was used as an example of a developing country, due to a lack of data. In principle, however, it can be said that FTCPs are superior to electric pumps in a number of respects: FTCPs can be manufactured locally without in-depth expertise or sophisticated tools. This allows value to be created at local level. Furthermore, the pump has no complex components and can therefore be operated and maintained by non-professionals.

### 5 Outlook and Full Work

This work demonstrated that the FTCP is technically feasible and suitable for small scale irrigation. However, the performance of the pump is highly dependent on local conditions. In addition, the design of the FTCP in terms of turbine, number of coils and hose diameter is of central importance. A reliable safety device for the pump still needs to be defined to prevent it from drifting away even at higher flow velocities, for example due to heavy rainfall. This publication is based on the contents of a master's thesis. The complete thesis is available online via the QR code on the left. The QR code on the right opens a video showing the FTCP during testing in the river Vils in Amberg.



Master's Thesis



Video of testing

## Acknowledgement

This research was supported by the *Department of Mechanical Engineering / Environmental Technology at the OTH Amberg-Weiden*. We would like to thank the department for their financial contribution to the practical implementation of the test apparatus as well as the pump and hope that the results of this thesis demonstrate that this support was worthwhile. The practical implementation of the test apparatus and FTCP was assisted by mas-

ter craftsmen *Markus Matt* and *Gerald Weigl*, employees at the central workshop in Amberg, OTH Amberg-Weiden. We would like to express our sincere thanks for this tremendous support. Finally, we like to thank our contract teacher *Prof. Dr. jur. Otto K. Dietlmeier*, consulting the project regarding legal issues exploiting a Bavarian water body.

---

## References:

- [1] Pandey, A.; Bijukchhe, P.L.; Khanal, P.; Acharya, S.; Chitrakar, S.; Neopane, H.P. Numerical study of a coil pump and comparison with field measurement. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2023, 1279, 12002, doi:10.1088/1757-899X/1279/1/012002.
- [2] Meseret, M.; Wami, D.; Nallamothe, R.B. Experimental study on the parameters affecting the performance of spiral tube pump. *Sci. Rep.* 2024, 14, 22425, doi:10.1038/s41598-024-73234-w.
- [3] Mortimer, G.H.; Annable, R. The Coil Pump – Theory And Practice. *Journal of Hydraulic Research* 1984, 22, 9-22, doi:10.1080/00221688409499408.
- [4] Khanal, P.; Acharya, S.; Shrestha, M.; Chitrakar, S.; Neopane, H.P. Design, Fabrication and Testing of River Water Pump for Rural Communities. *Kathmandu University J of Sci, Engineering & Technol* 2024, 15, doi:10.3126/kuset.v15i2.63360.
- [5] Kassab, S.Z.; Naby, A.A.A.; Basier, El Sayed I. Abdel. PERFORMANCE OF MULTI-LAYERS COIL PUMP 2006.
- [6] Kassab, S.Z.; Naby, A.A.A.; Basier, El Sayed I. Abdel. COIL PUMP PERFORMANCE UNDER VARIABLE OPERATING CONDITIONS 2005.

## KONTAKT



**Axel Popp, M.Eng.**

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

a.popp1@oth-aw.de



**Rodi Attou**

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

r.attou@oth-aw.de



**Nikil Bansode, B.Tech.**

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

n.bansode@oth-aw.de



**Clemens Heuermann, B.Eng.**

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

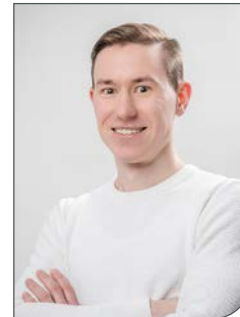
c.heuermann@oth-aw.de



**Mohamed Salih, M.Eng.**

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

m.salih@oth-aw.de



**Leonid Tomko, M.Eng.**

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

l.tomko@oth-aw.de



**Dipl.-Ing. (FH) Harald Wirth**

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

h.wirth@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Andreas P. Weiß**

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

a.weiss@oth-aw.de

# SEI DER FUNKE, DER DAS FEUER VON HORN ENTFACHT



Bei HORN arbeiten Menschen mit Leidenschaft für Technik, Präzision und Innovation. Gemeinsam entwickeln wir weltweit Lösungen, die die Zukunft der Glasherstellung gestalten.

Global vernetzt und regional verwurzelt – HORN steht für Fortschritt, Teamgeist und technische Exzellenz. Werden Sie Teil unserer Erfolgsgeschichte und erlebe, was es heißt, Technologie mitzugestalten.

Erfahren Sie mehr über Ihre Karrierechancen und unsere Benefits unter

[www.hornglass.com/karriere](http://www.hornglass.com/karriere)

**Wir freuen uns auf Ihre Bewerbung!**

Bei Fragen wenden Sie sich gerne an Frau **Sabine Götz**: +49 (0) 9636 / 9204-118 | [personal@hornglas.de](mailto:personal@hornglas.de)  
HORN Glass Industries AG | Bergstrasse 2 | 95703 Plössberg | [www.hornglass.com](http://www.hornglass.com)



**Genossenschaftlich heißt,  
Verantwortung für die Region tragen.**

**Morgen kann kommen.**

**Wir machen den Weg frei.**

Als Genossenschaftsbank sind wir unseren Mitgliedern verpflichtet und der Region, in der sie leben und arbeiten.

Daher fördern wir Initiativen, die sich vor Ort für die Umwelt und für gesellschaftlichen Zusammenhalt starkmachen.

[vr-nopf.de](http://vr-nopf.de)



**Volksbank Raiffeisenbank  
Nordoberpfalz eG**



# Testfeld für intelligente Infrastruktur in Amberg



## Zusammenfassung

Das von der DFG geförderte Forschungsprojekt VRUIDFUL verfolgt das Ziel, ein Testfeld mit intelligenter Infrastruktur rund um den Amberger Campus aufzubauen. Dieses Testfeld soll künftigen Forschungsprojekten als Grundlage dienen, insbesondere für die Entwicklung KI-gestützter Algorithmen zur Intentionserkennung vulnerabler Verkehrsteilnehmer (VRU). Hierfür werden nach und nach intelligente Infrastruktureinheiten mit Sensorik installiert, die die für die Modellentwicklung erforderlichen Daten erfassen und der Forschungsgemeinschaft bereitstellen. Im Mittelpunkt des Projekts stehen der Aufbau dieser Infrastruktureinheiten, die Kalibrierung und Fusion der Sensoren sowie die datenschutzkonforme Aufbereitung der gewonnenen Informationen.

## Abstract

The DFG-funded research project VRUIDFUL aims to establish a testbed with intelligent infrastructure around the Amberg campus. This testbed is intended to serve as a foundation for future research projects, particularly for the development of AI-based algorithms for intention recognition of vulnerable road users (VRU). To this end, intelligent infrastructure units equipped with sensors will be gradually installed to collect the data required for model development and make it available to the research community. The project focuses on the deployment of these infrastructure units, the calibration and fusion of the sensors, as well as the data processing, all in compliance with applicable data protection regulations.

## 1 Einleitung

Im Rahmen des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsprojekts VRUIDFUL („Vulnerable Road User Intention Detection For Urban Locations“) entsteht ein intelligentes Testfeld rund um den Campus der OTH Amberg-Weiden in Amberg (siehe Abbildung 1). Mit dessen Hilfe soll es weiterführenden Forschungsprojekten möglich sein, eine Intensionsprädiktion von verletzlichen Verkehrsteilnehmern zu erlernen und durchzuführen. Auf Basis vernetzter Infrastruktur soll dadurch die Sicherheit von nicht-motorisierten, „verletzlichen“ Verkehrsteilnehmern (VRU) verbessert werden. So können beispielsweise kritische Szenarien, die zu Unfällen führen können, frühzeitig erkannt werden, und Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen eingeleitet werden (siehe Beispiel in Abbildung 2).



Abbildung 1: Testfeld um den Campus in Amberg

Im VRUIDFUL-Testfeld sollen intelligente Infrastruktureinheiten, sogenannte „Road Side Units“ (RSU) zum Einsatz kommen. Unter einer RSU versteht man eine an der Straßenseite platzierte Infrastruktureinheit, die drahtlose Kommunikation ermöglicht, Informationen sammelt und diese zwischen den Verkehrsteilnehmern und der Infrastruktur (z. B. Ampelanlagen) austauscht. Dadurch können nicht nur die Sicherheit, sondern auch das Verkehrsmanagement und die Effizienz profitieren. Bei den RSUs liegt dabei der Fokus auf dem Einsatz von verschiedenen Sensoren in Kombination mit KI-unterstützten Recheneinheiten „in der Edge“, also direkt in der RSU vor Ort.

Im ersten Schritt nach der Installation der RSU werden zunächst Daten unter Beachtung der geltenden Datenschutzbestimmungen gesammelt, mithilfe derer später die erwähnten KI-Modelle zur Intentionserkennung von vulnerablen Verkehrsteilnehmern trainiert werden können. Weiterhin sollen die gesammelten Daten anonymisiert der Forschungsgemeinde und der Öffentlichkeit bereitgestellt werden. Der Aufbau soll zudem auch als Basis für die Ausweitung auf weitere, interdisziplinäre Untersuchungen dienen, wie z. B. Messgeräte für die Erhebung von Umwelteinflüssen des Verkehrs auf das Stadtklima. Die mit dem Testfeld abzuleitenden Forschungsergebnisse tragen sowohl zum EU-Ziel „Vision Zero“ [2] als auch zur „Klimaneutralität“ bei.

## 2 Sensorik

Für die Entwicklung der Intentionserkennung müssen die RSUs in der Lage sein, einzelne Verkehrsteilnehmer zu erkennen und zu unterscheiden. Speziell für Fußgänger, aber auch Radfahrer soll es möglich sein, diverse zukünftige Bewegungsbahnen (sog. Trajektorien) mit der dazugehörigen Wahrscheinlichkeit vorherzusagen. Dafür werden vor allem die folgenden Informationen benötigt:

- Position
- Geschwindigkeitsvektor
- Trajektorie
- Körperhaltung („Pose“)

Basierend auf diesen zu erfassenden Parametern werden die RSUs mit entsprechender Sensorik ausgerüstet. Der Fokus liegt dabei auf einem möglichst breiten Spektrum an Sensoren, damit auch zukünftige Forschungsprojekte vielseitige Datenquellen nutzen können. Es kommen daher folgende Sensoren zum Einsatz:

- **Lidar:** Light Detection and Ranging (Lidar) bietet eine schnelle und datensparsame Art der Umgebungserfassung, die unabhängig von Lichtverhältnissen und weitgehend unabhängig von den Witterungsverhältnissen ist. Es liefert präzise Entfernungsmessungen, die es in Kombination mit anderen Sensoren ermöglichen, Objekte sicher im dreidimensionalen Raum

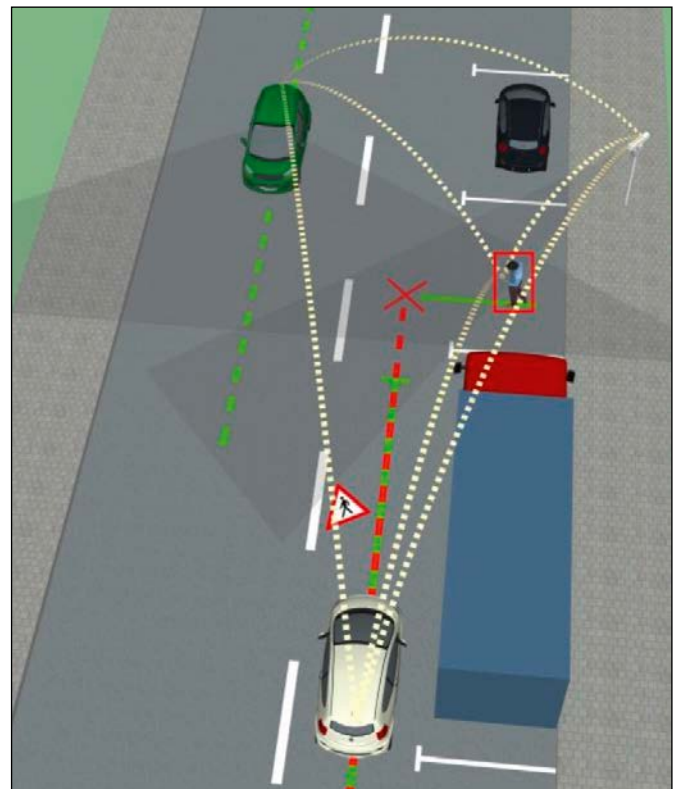


Abbildung 2: Beispielszenario zur frühzeitigen Erkennung einer bevorstehenden Kollision [1]

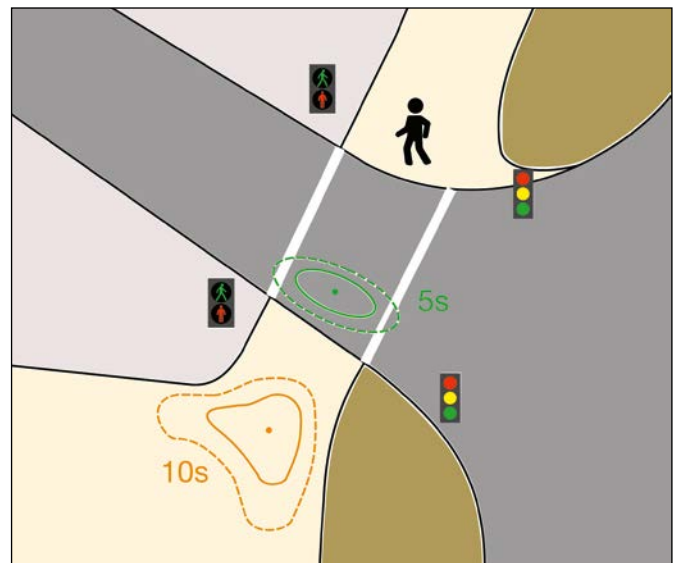


Abbildung 3: Beispiel einer Trajektorien-Vorhersage für mehrere Zeitpunkte

zu lokalisieren. Das Ergebnis eines Lidar-Scans ist eine Punktwolke bestehend aus einzelnen Distanzmessungen. In diesem Projekt kommen kostengünstige Solid-State-Lidare zum Einsatz, die im Vergleich zu den mechanisch scannenden Modellen einen eingeschränkten Aufnahmebereich aufweisen.

- **Radar:** Radio Detection and Ranging (Radar) liefert ähnlich wie Lidare Distanzmessungen, ist aber darüber hinaus auch in der Lage, Geschwindigkeiten direkt zu messen. Die Technik funktioniert zuverlässig bei allen Wetterlagen.

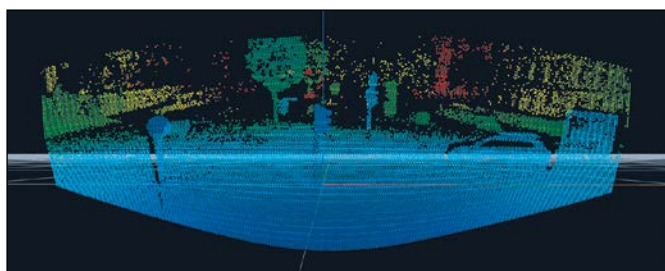


Abbildung 4: Punktwolke eines Lidarscans

- **(Stereo-)Kamera:** Für die Klassifizierung und Posen-Erkennung der VRU sind Kameras am besten geeignet [3]. Im Stereobetrieb können durch Auswertung der Disparität zusätzlich flächendeckend grobe Distanzinformationen aus den Bildern ermittelt werden. Dies stellt eine sinnvolle Ergänzung zu den Lidarsensoren dar, welche nur an bestimmten Punkten messen.

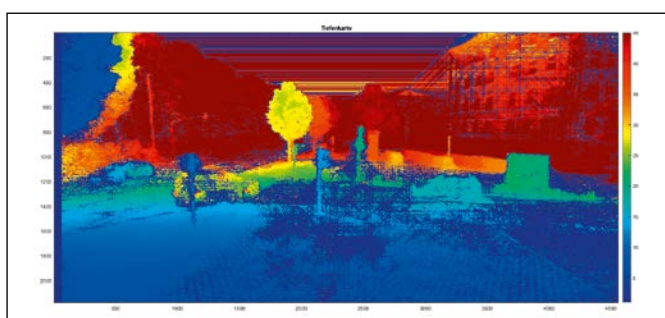


Abbildung 5: Tiefenkarte der Stereokamera

- **Wärmebildkamera:** Als Fallbacklösung bei schlechten Sichtverhältnissen kann eine Wärmebildkamera zusätzliche Abhilfe schaffen. Wärmebildkameras erfreuen sich aufgrund ihrer ganztägigen Zuverlässigkeit und ihrer datenschutzunbedenklichen Aufnahmen großer Beliebtheit.

Zusätzlich zu den für die VRU-Intentionserkennung benötigten Sensoren kommen in der RSU noch einige Umweltsensoren zum Einsatz. Deren Daten sollen sowohl genutzt werden, um den Einfluss bestimmter Größen auf die Performanz der anderen Sensorik zu überprüfen, als auch, um mögliche Verbindungen zwischen Umweltparametern und dem Verhalten der VRUs herauszufinden. Die Umweltdaten sind aber auch als Ergänzung des gesamten Forschungsdatensatzes zu sehen, der es zukünftigen Projekten ermöglichen soll, Forschungsfragen im Bereich Umwelt im urbanen Raum sowie den Einfluss des Verkehrs auf diesen zu untersuchen. Es kommt folgende Umweltsensorik zum Einsatz:

- **Wetterstation:** Messung aller relevanten Wetterinformationen, wie Niederschlag, Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Luftfeuchte und weitere.
- **Luftqualitätsmesser:** Ermittelt einen Index der Luftqualität durch Messung verschiedener Gase ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}_3$  und  $\text{CO}$ ) und Feinstaub ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_1$ ).
- **$\text{CO}_2$ -Sensor**

### 3 Kommunikation

Kommunikation ist eine essenzielle Aufgabe intelligenter Infrastruktur. Durch den gezielten Austausch von Informationen sollen die verschiedenen Verkehrsteilnehmer befähigt werden, besser auf potenziell gefährliche Situationen zu reagieren. Die in den RSUs installierten Sensoren liefern dabei große Mengen an Daten, die in Echtzeit verarbeitet werden müssen. Diese Daten an alle Teilnehmer gleichzeitig zu versenden, ist nahezu unmöglich. Hier kommt der Vorteil der Verarbeitung in der Edge ins Spiel: KI-Modelle ermöglichen es, große Datenmengen direkt innerhalb der jeweiligen RSU effizient auszuwerten. Im Anschluss müssen nur noch abstrahierte Daten in vergleichsweise kleinen Informationspaketen übertragen werden, wie etwa die Position, Geschwindigkeit oder Bewegungsrichtung eines Radfahrers.

Die darauf aufbauende Kommunikation zwischen Fahrzeugen und anderen Entitäten wie Infrastruktur, anderen Fahrzeugen oder auch Fußgängern wird unter dem Begriff V2X („Vehicle-to-Everything“) zusammengefasst.

Für die Umsetzung von V2X kommen unterschiedliche Funkstandards zum Einsatz. In Europa ist vor allem ITS-G5 verbreitet, ein auf IEEE 802.11p basierender WLAN-Standard, der speziell für die Anforderungen im Straßenverkehr entwickelt wurde. Daneben gewinnt C-V2X („Cellular-V2X“), das auf Mobilfunktechnologien wie LTE und 5G basiert, zunehmend an Bedeutung. Beide sollen im Projekt zum Einsatz kommen.

Bevor jedoch dieser Informationsaustausch stattfinden kann, müssen die zugrundeliegenden KI-Modelle entwickelt und trainiert werden. Dafür müssen Unmengen an Sensorrohdaten übertragen und verarbeitet werden. Ein Teil des Projektes ist daher auch die Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur Übertragung der Sensordaten an den verschiedenen RSU-Standorten.

### 4 Edge-Verarbeitung

Der Hauptteil der Datenverarbeitung findet später in der Edge, also der jeweiligen RSU statt. Für die Intentionserkennung müssen die gesammelten Informationen der verschiedenen Sensoren kombiniert werden. Man spricht in diesem Kontext daher von Sensorfusion. In Abbildung 6 ist die schrittweise Verarbeitung in der RSU dargestellt.

Man kennt dabei die zwei bereits erwähnten Wege, die zur Übertragung führen: die Übertragung von Rohdaten bzw. teilverarbeiteten Daten sowie der aus der Intentionserkennung resultierenden Trajektorie eines oder mehrerer VRU.

Eine umfangreichere Vorverarbeitung findet dabei vor allem bei den Kamerabildern statt. Zum einen müssen

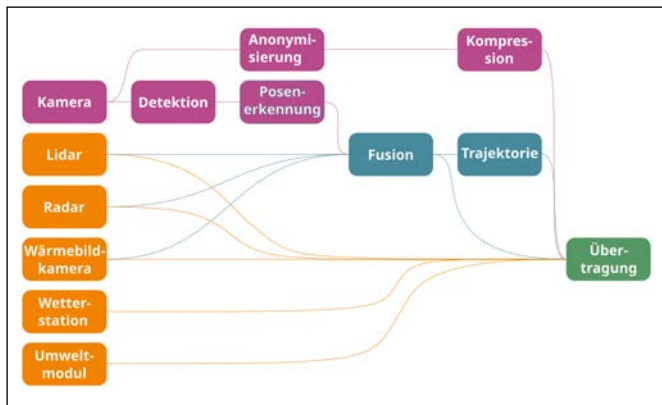


Abbildung 6: Edge-Verarbeitungs-Pipeline

die aufgenommenen Bilder vor der Übertragung anonymisiert werden, um den geltenden Datenschutzbestimmungen zu entsprechen (Abbildung 7 links). D. h. Gesichter und Kennzeichen müssen unkenntlich gemacht werden. Auch hierfür wird ein KI-Modell direkt in der RSU eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass biometrische Daten niemals die RSU verlassen.

Auf der anderen Seite wird die Körperhaltung (die „Pose“) aller erkannten VRU aus dem Bild extrahiert (Abbildung 7 rechts). Danach werden die Daten fusioniert. Mittels der fusionierten Daten kann die Position und Bewegungsrichtung jedes Verkehrsteilnehmers im dreidimensionalen Raum bestimmt werden. In Verbindung mit der Körperhaltung können daraus Rückschlüsse auf wahrscheinliche zukünftige Trajektorien und Verhaltensweisen geschlossen werden.



Abbildung 7: Beispiele für Anonymisierung (links) und Posen-Erkennung (rechts)

## 5 RSU-Prototyp



Abbildung 8: Prototyp der RSU am Digitalen Campus

Das Testfeld des Projekts soll nach und nach in den umliegenden Straßen des Amberger Campus der OTH Amberg-Weiden entstehen. Dabei werden der Reihe nach die einzelnen RSUs installiert und in Betrieb genommen. Das Testfeld umfasst dabei diverse Straßen- und Kreuzungstypen mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen, Fußgängerüberwege, Parkplätze, Ampelanlagen etc. Dadurch sollen verschiedenste Verkehrsszenarien erfasst werden können. In Abbildung 1 ist das Testfeld mit den geplanten Aufstellpositionen von RSUs dargestellt.

Der erste Prototyp einer RSU wurde am Vordach des Digitalen Campus in Testfeld 1 angebracht (siehe Abbildung 8). In den nächsten Jahren folgen weitere stationäre und auch mobile RSUs.

## Referenzen:

- [1] E. Commission, EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 – Next steps towards “Vision Zero”, Brüssel: European Commission, 2019.
- [2] M. Bieshaar , G. Reitberger und S. Zernetsch, „Detecting Intentions of Vulnerable Road Users Based on Collective Intelligence“, Automatisiertes und vernetztes Fahren (AAET), 2017.
- [3] A. Abdelrahman, Z. Islam und M. Abdel, „VRUCrossSafe for crossing intention prediction of vulnerable road users for improving safe crossing at intersections“, npj Sustainable Mobility and Transport, 21 05 2025.

## Fördergeber:

Das Projekt VRUIDFUL wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter der Nummer INST 925/10-1 gefördert.



## KONTAKT



**Martin Fischer, M.Sc.**

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

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



**Heike Lepke, M.Eng.**

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

[h.lepke@oth-aw.de](mailto:h.lepke@oth-aw.de)



**Prof. Dr.-Ing. Alfred Höß**

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

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

## KI-Anwendungen im IT-Service-Umfeld

### Zusammenfassung

Der Autor betreut seit 20 Jahren IT-Unternehmen bei ihrem Business Model Setup und ihrer Internationalisierungsstrategie. In dieser Zeit haben sich vielfältige Strukturwandlungsprozesse mit Auswirkung auf die Erbringung von IT-Service-Leistungen ergeben. Dieser Beitrag untersucht die Bedeutung von aktuellen KI-Anwendungen im Bereich des IT-Service-Umfeldes aus der Perspektive von Nutzern (Anwenderperspektive) sowie von Leistungserbringern (Anbieterperspektive).

### Abstract

The author has been advising IT companies on their business model setup and internationalization strategy for 20 years. During this time, a wide range of structural change processes have emerged that have had an impact on performing IT services. This article examines the significance of current AI applications in the IT service environment from the perspective of users (user perspective) and service providers (provider perspective).

### 1 Hinführung zum Thema

Dieser Beitrag entstand im Zusammenhang mit einem Praxissemesterprojekt an der OTH Amberg-Weiden im Sommersemester 2025. In das Projekt waren auch Studierende der Masterprogramme Interkulturelles Unternehmens- und Technologie Management sowie Wirtschaftsingenieurwesen involviert. Ferner wirkte der Kooperationspartner VALEO IT Services International GmbH als wichtiger, strukturell und organisatorisch unterstützender Partner mit.

Als Hinführung zum Thema empfiehlt sich zunächst ein Blick auf die historisch ursprüngliche Organisationsform der hier fokussiert betrachteten IT-Support-Dienstleistungen für B2B-Zielgruppen: Diese wurden von großen, international tätigen Unternehmen typischerweise mit einer sogenannten „Local for local-Strategie“ erbracht. Dabei findet die Leistungserbringung und Nachfrage im gleichen Sprachraum und in der gleichen Zeitzone statt. Es bestehen also dezentrale nationale Strukturen für das IT-Service-Umfeld. Dies ermöglichte zwar oft einen hochwertigen, regional differenzierten IT-Service auf hohem Niveau, führte aber zu relativ hohen Kosten, speziell in

hochpreisigen Industrieländern. Bereits zu Beginn des letzten Jahrzehnts wurden daher aus Effizienzsteigerungsgründen sogenannte „Best-Cost Countries“ als bevorzugte Orte der Leistungserbringung erschlossen.

So hat beispielsweise bereits zu Beginn des letzten Jahrzehnts die Oracle Corporation ihre vielfältigen Länder-Support-Organisationen in Zentraleuropa zu Gunsten eines neuen, kosteneffizienten Standorts in Rumänien aufgelöst. Dies bedeutete eine weitergehende Internationalisierung von Support-Dienstleistungen in dem Sinne, dass der Ort der Leistungserbringung und der Ort der Leistungsnachfrage zunehmend auseinanderfielen.

In dieser Phase war auch eine zunehmende Internationalisierung bei mittelständischen IT-Service-Unternehmen zu beobachten, um die üblichen „Mensch zu Mensch-Dienstleistungen“ möglichst kostenwirtschaftlich organisieren zu können.

VALEO IT Services International GmbH aus Luhe-Wildenaue ist dazu ein Beispiel eines ursprünglich nationalen Unter-

nehmens mit einem heute global organisierten Geschäftsmodell im Bereich IT-Services mit Standorten auf drei Kontinenten.

Weiterer Effizienzdruck und die international zunehmend spürbare Knappheit bei IT-Fachkräften führt seit einigen Jahren zu einer weiteren Entwicklungsstufe, indem diese „Mensch zu Mensch-Dienstleistungen“ durch KI-basierte Systeme ergänzt und teilweise abgelöst werden. Dies ist freilich nur vorstellbar, weil heute die Verfügbarkeit der basistechnologischen Möglichkeiten diese Entwicklung bzw. Anwendung in breiteren Anwendungsfällen ermöglicht.

Ziel dieser Untersuchung ist zu erkennen, in welchem Umfang und mit welchen inhaltlichen Schwerpunkten KI-Systeme im IT-Service-Umfeld bereits praktische Bedeutung und Anwendung in den Unternehmen finden.

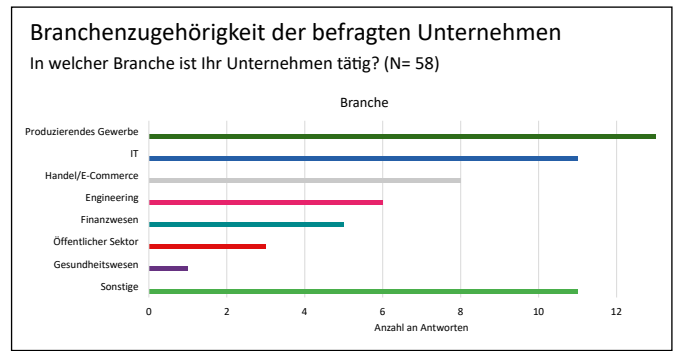
Dazu wurden primäre Daten über mehrere Wege erhoben: So wurden mit ausgewählten Großunternehmen in Deutschland Experten-Interviews auf IT-Managementebene geführt. Ferner wurde eine online-basierte Befragung von Unternehmen unterschiedlicher Branchen, die IT-Service-Dienstleistungen benötigen (= Anwenderperspektive), durchgeführt. Eine weitere online-basierte Befragung richtete sich an IT-Service erbringende Unternehmen (= Anbieterperspektive), um zu erkennen, mit welchen KI-Tools und -Strategien in der Praxis von Anbieterseite bevorzugt gearbeitet wird.

## 2 Primäre Marktforschung: Anwenderperspektive

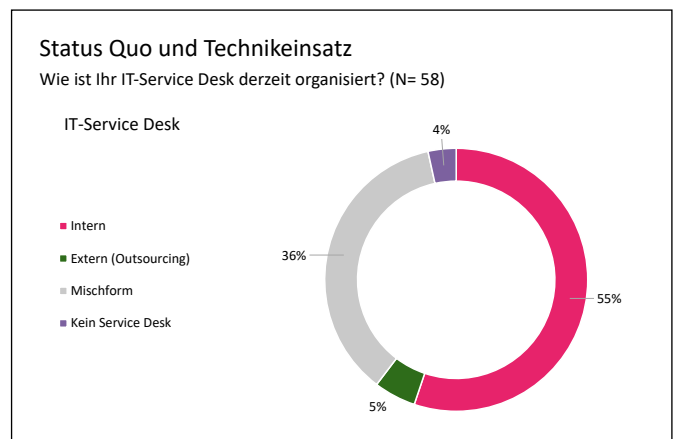
Die Befragung wurde als Online-Befragung im Mai 2025 durchgeführt. Für die Online-Befragung wurde als Instrument Microsoft-Forms eingesetzt. Zur Ansprache von Interviewpartnern wurden über das soziale Netzwerk LinkedIn geeignete Experten mit IT-Erfahrung in unterschiedlichen Branchen selektiert und individuell adressiert. Nach Bestätigung der entsprechenden Einladung wurde an 652 Personen ein entsprechender Link zum Fragebogen versendet. An der Befragung haben 58 Personen teilgenommen, was einer Rücklaufquote von ca. 9 % entspricht.

Im Folgenden sind ausgewählte Erkenntnisse aus dieser Befragung zusammenfassend dargestellt.

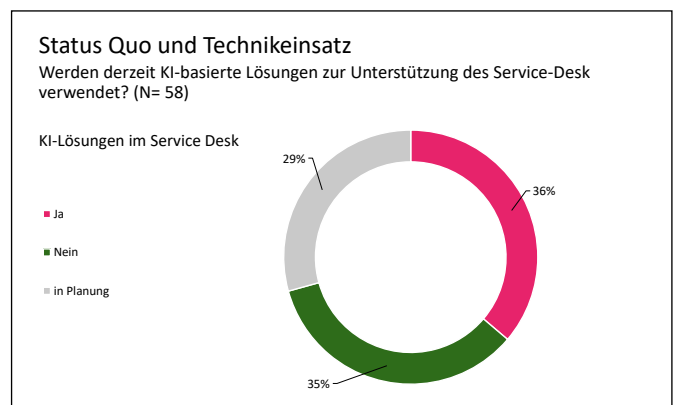
Die Aufschlüsselung der Branchenzugehörigkeit der befragten Unternehmen zeigt eine breit diversifizierte Struktur, welche die Vielfalt im Wirtschaftsleben widerspiegelt.



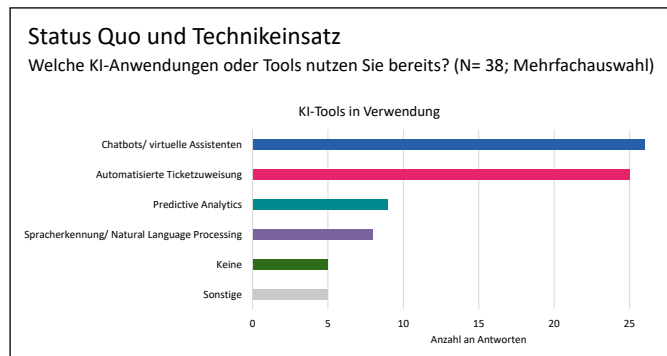
Die Interviewpartner wurden nach der aktuellen Organisationsform ihrer IT-Service-Leistungserbringung gefragt. Die Mehrheit erstellt die IT-Service-Leistungen intern mit eigenen Ressourcen (55 %). Lediglich 5 % verfolgen eine reine Outsourcing-Strategie mit externen Dienstleistern, während 36 % eine Mischstrategie aus eigenen Leistungsbeiträgen und Outsourcing verfolgen.



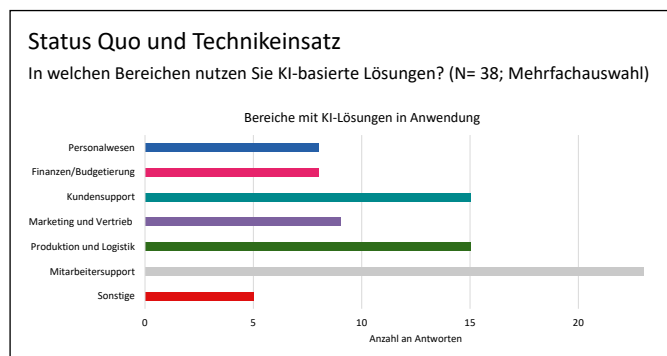
Interessant sind die Antworten zur aktuellen Verwendung KI-Tools zur Unterstützung des IT-Service-Desks. Hier zeigt sich eine Verteilung in ähnlich große Anteile: 36 % der Befragten verwenden bereits KI-Tools, 29 % planen dies gerade und 35 % haben aktuell keine KI-Tools in Vorbereitung oder Anwendung. Hier zeigt sich also noch ein deutliches Wachstumspotenzial in der möglichen Durchdringungsrate für die praktische Anwendung.



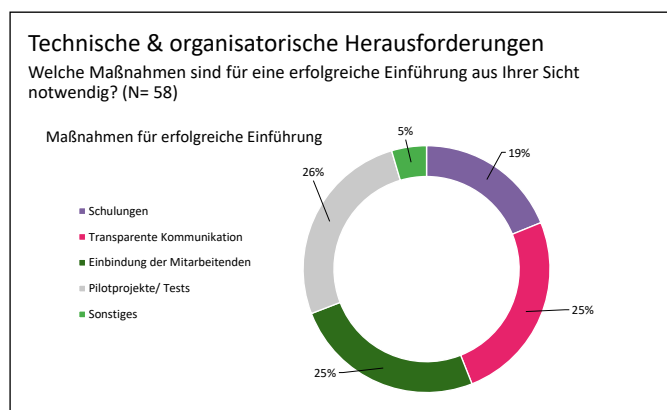
Besonders interessant ist die Frage, welche konkreten Anwendungsfelder innerhalb der IT-Service-Leistungen bereits mit KI-Tools bearbeitet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere Chatbots und automatisierte Ticketklassifikation als relevant genannt werden. Diese Schwerpunkte werden auch durch die Befragungsergebnisse aus den Experteninterviews bestätigt.



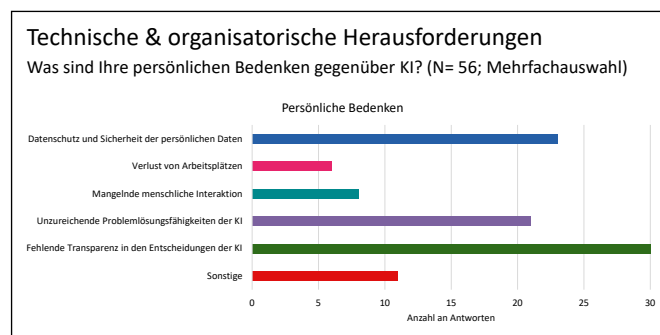
Interessant ist die hohe Bedeutung des Anwendungsfelds „Mitarbeitersupport“ im Vergleich zur Anwendung von KI-Tools in anderen zentralen Funktionsbereichen in Unternehmen. Diese Erkenntnis betont die besondere Relevanz der Untersuchungsfrage gerade auch für das IT-Service-Umfeld.



Neben den Anwendungsschwerpunkten interessiert auch aus Nutzerperspektive zielführende Maßnahmen für eine erfolgreiche Implementierung zu erkennen. Für eine erfolgreiche Einführung besteht eine besondere Bedeutung für Pilotprojekte und Tests. Auch transparente Kommunikation mit einer aktiven Einbindung der Mitarbeiter und Schulungen erweisen sich als relevant.



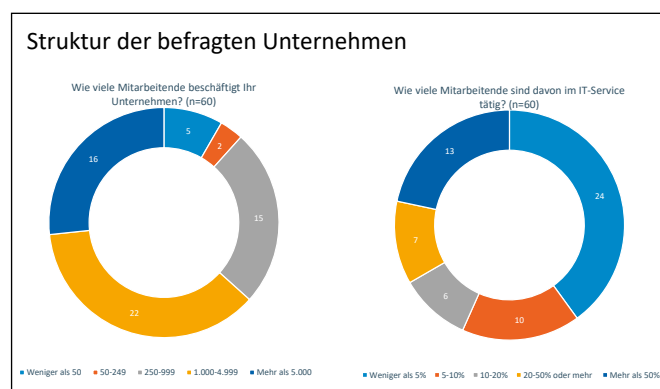
KI-Systeme sind in ihrer Anwendung nicht unumstritten und ihnen wird teilweise mit Bedenken begegnet. So zeigen sich in der Befragung von Anwendern Vorbehalte gegenüber der Entscheidungsautonomie von KI-Systemen und beim Datenschutz persönlicher Daten.



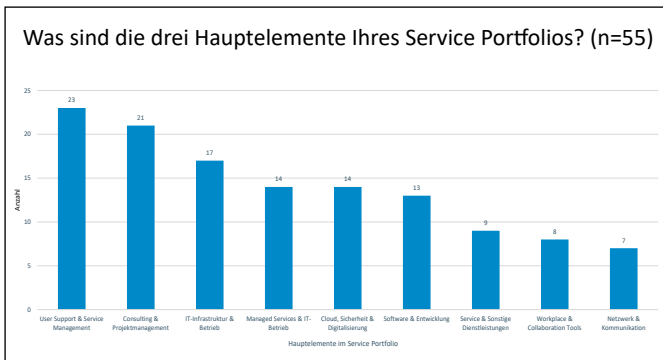
### 3 Primäre Marktforschung: Anbieterperspektive

In einer weiteren primären Marktforschung wurden Vertreter von IT-Unternehmen angesprochen, welche Bezug zu IT-Service-Leistungen haben. Diese wurden auf ihre Einschätzung zu KI-Tools in diesem Anwendungskontext befragt. Dazu wurde ebenfalls über das Netzwerk LinkedIn gearbeitet, wobei die Link-Versendung zum Fragebogen an 800 Adressaten ging. Davon haben 60 Personen an der Befragung teilgenommen, was einer Rücklaufquote von 7,5 % entspricht. Die Erhebung wurde zwischen dem 3. Mai und dem 9. Juni 2025 durchgeführt.

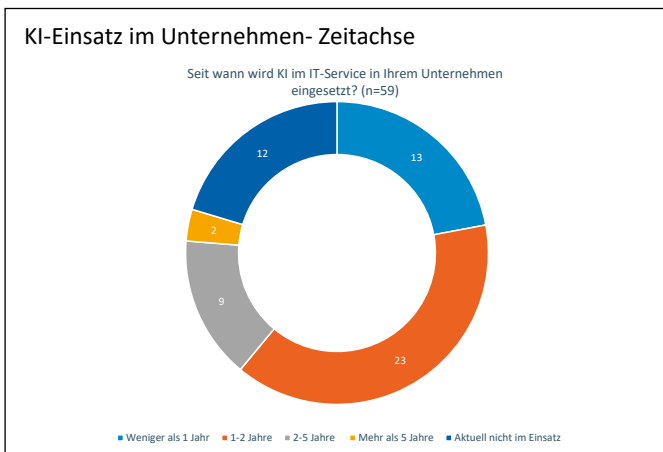
Adressiert wurden dabei Personen mit leitender IT-Funktion in Unternehmen der IT-Branche und einem Firmensitz in der DACH-Region. Großunternehmen mit mehr als 100 Mitarbeitern bilden die Mehrheit der antwortenden Unternehmen. Ein hoher Anteil der Antwortenden ist aktiv im IT-Service-Geschäft tätig. Die nähere Struktur der Befragten verdeutlichen die beiden folgenden Charts:



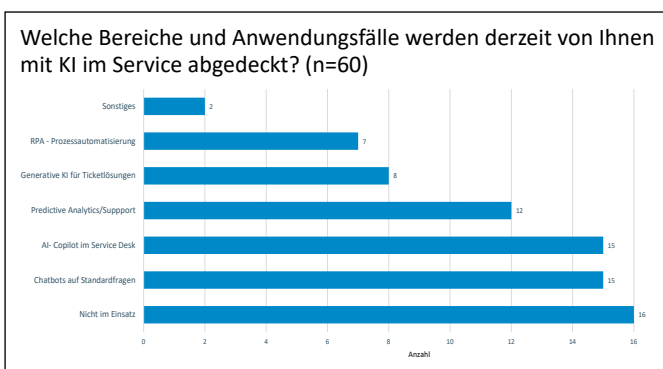
Die folgende Grafik zeigt den Umfang der Fokussierung der Geschäftsmodelle auf IT-Service-Dienstleistungen sowie auf weitere IT-Themen. Die befragten Unternehmen haben also klaren Bezug zu den hier interessierenden Forschungsfragen aus dem IT-Service-Umfeld.



Betrachtet man den zeitlichen Erfahrungshorizont der befragten IT-Unternehmen mit KI-Anwendungen, so erkennt man wenig überraschend, dass dies ein vergleichsweise aktuelles und „junges“ Thema auch bei professionellen und auf das Thema fokussierten IT-Unternehmen ist. Nur 2 der 59 Befragten beschäftigen sich seit über 5 Jahren mit diesem Thema, die meisten Befragten sind selbst erst seit kurzem in diesem Feld aktiv.



Die folgende Abbildung zeigt ein Ranking der typischen Anwendungsfälle für KI basierte Lösungen aus Anbieterperspektive. Interessant ist, dass sich der Balken mit den meisten Nennungen auf „(noch) keine KI-Anwendungen im IT-Service“ bezieht. Hier zeigt sich erneut ein Wachstumspotential im Sinne von Reserven für eine weitere Marktdurchdringung dieser Technologie. Die positiv benannten Anwendungsfelder thematisieren Chatbots und die Lösung von Standardfragen im Servicedesk und somit ähnliche Schwerpunkte wie es sich auch in der Befragung aus der Anwenderperspektive gezeigt hatte.



Versteht man die befragten IT-Führungskräfte als Experten in der Anwendung von KI-Technologie, so sind deren Einschätzung von Chancen und Risiken dieser Technologie von hohem Interesse. Die folgende Abbildung zeigt die positiven Potenziale sowie die kritischen Anmerkungen bzw. Bedenken im Überblick:

Wie bewerten Sie persönlich den Einsatz von Künstlicher Intelligenz im IT-Service?



#### Positive Einschätzungen und Nutzen:

- Automatisierung von Routinetätigkeiten (z. B. Ticketklassifizierung, Standardantworten)
- Entlastung des First-Level-Supports
- Produktivitätssteigerung, vor allem durch schnellere Reaktionszeiten
- Vermeidung von Personalengpässen
- 24/7 Verfügbarkeit und Standardisierung
- Flexibilität für Nutzer durch Interaktion mit KI
- Skalierbarkeit, sodass Mitarbeiter mehr Zeit für komplexere Aufgaben haben



#### Kritik und Bedenken:

- Datenqualität ist entscheidend („Schlechte Daten führen zu schlechten Ergebnissen“)
- Falsche Antworten wirken oft glaubwürdig und können Schaden anrichten
- Missbrauchsgefahr (z. B. durch KI-Manipulation)
- Technische Grenzen (z. B. bei komplexen DevOps-Aufgaben oder Third-Level-Support)
- Verunsicherung durch mangelndes Wissen – Kluft zwischen „Wissenden“ und „Unwissenden“
- Systemintegration notwendig – ohne saubere Anbindung kein Nutzen

## 4 Zusammenfassung

Die Befragung zeigt sowohl aus Anwender- als auch aus Anbietersicht für KI-Anwendungen im IT-Service-Umfeld bereits rege praktische Verbreitung, wobei noch deutliche Wachstumspotenziale in der Technologiedurchdringung und in weiteren Innovationen im Markt bestehen. Da es sich um eine junge Technologie handelt, bestehen neben Chancen auch diverse Bedenken, die bei den Befragten neben Datenschutzfragen um die Zuverlässigkeit der Technologie in der praktischen Anwendung kreisen, vor allem jenseits einfacher repetitiver Standardprozesse. Eine gewisse menschliche Kontrolle bzw. die Integration menschlicher Interaktion in sensiblen bzw. komplexeren Themenbereichen erscheint daher bei KI-Lösungen in der Praxis weiterhin erforderlich.

In der Technologieauswahl zeigen sich Spannungsfelder: So formulieren Interviewpartner in den Experteninter-

views einerseits eine gewisse Sorge hinsichtlich der möglichen Abhängigkeit von ausschließlich US-amerikanischen Softwarepaketen und fragen nach europäischen Alternativen. Andererseits bieten gerade marktführende KI-Lösungsanbieter wie OpenAI mit ChatGPT oder Micro-

soft mit dem Co-Pilot gezielt nutzerfreundliche, individuell für Unternehmen selbst ausgestaltbare sogenannte On-Premise-Lösungen an, die aktuell auf großes Interesse im Markt stoßen.

---

**Projektpartner:**

VALEO IT Services International GmbH, 92706 Luhe-Wildenau

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

## KI-Tutoringsysteme in der Hochschullehre – Erfahrungen aus dem Einsatz von OneTutor

### Zusammenfassung

KI-Tutoringsysteme bieten das Potenzial, Lernprozesse durch adaptive Unterstützung zu fördern und Barrieren im Frageverhalten zu reduzieren. Mit OneTutor wird an der OTH Amberg-Weiden seit dem Sommersemester 2025 ein KI-Tutoringsystem getestet und im Rahmen einer Begleit-evaluation untersucht. Die Evaluation umfasst eine Studierendenbefragung sowie eine Lehrendenbefragung. Erhoben wurden im Sommersemester 2025 Aspekte der Akzeptanz, lernstrategisches Nutzungsverhalten, Frageverhalten und Motivation der Studierenden sowie die Perspektive der Lehrenden.

Die Ergebnisse zeigen, dass OneTutor überwiegend als verständnisfördernd und unterstützend für Lernprozesse wahrgenommen wird. Besonders außerhalb von Lehrveranstaltungen nutzen Studierende das System zur Wiederholung von Inhalten, Klärung offener Fragen und Bearbeitung komplexer Aufgaben. Hinsichtlich der Akzeptanz lassen sich Faktoren wie wahrgenommene Nützlichkeit, Einfachheit der Nutzung und Sicherheit identifizieren. Zudem geben Studierende an, dass es ihnen mit OneTutor leichtfällt, Fragen zu stellen. Motivationale Aspekte wie Kompetenzerleben und Interesse werden ebenfalls positiv hervorgehoben. Lehrende bewerten die Chatfunktion teilweise zufriedenstellend, sehen jedoch Entwicklungsbedarf bei der Quizfunktion und dem Einsatz in Fachdomänen wie der Mathematik.

Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial von KI-Tutoringsystemen wie OneTutor für eine individualisierte Hochschullehre, verdeutlichen aber zugleich die Notwendigkeit systematischer Weiterentwicklung und breiterer Implementierung, um Akzeptanz und Wirksamkeit nachhaltig zu sichern.

### Abstract

AI tutoring systems offer the potential to promote learning processes through adaptive support and to reduce barriers in questioning behaviour. At OTH Amberg-Weiden, the AI tutoring system OneTutor has been piloted since the summer term of 2025 and is being investigated as part of an accompanying evaluation study. The evaluation includes questionnaires of both students and lecturers. During the summer term of 2025, aspects of acceptance, learner's strategic use of the system, questioning behaviour and student motivation, as well as the perspective of the lecturers were assessed.

The results show that OneTutor is predominantly perceived as promoting understanding and supporting learning processes. In particular outside of courses, students use the system to review content, clarify open questions and work on complex tasks. Factors such as perceived usefulness, ease of use and security can be identified with regard to acceptance. In addition, students state that OneTutor makes it easy for them to ask questions. Motivational aspects such as the experience of competence and interest are also highlighted positively. Lecturers rated the chat function as satisfactory in some cases, but identified a need for further development of the quiz function and its use in subject areas such as mathematics.

The results underline the potential of AI tutoring systems such as OneTutor for individualised higher education, while also emphasising the need for systematic further development and broader implementation to ensure acceptance and effectiveness in the long term.

## 1 Künstliche Intelligenz trifft Hochschullehre

Zu den Grundanliegen gelingender Hochschullehre gehören die intensive Auseinandersetzung der Studierenden mit den Lerninhalten, das Entwickeln eines tieferen Verständnisses für die Themen der jeweiligen Domäne und das Entwickeln der Fähigkeit, komplexe Probleme im beruflichen und sozialen Alltag lösen zu können. Dabei stehen Hochschulen und Lehrende vor wachsenden Herausforderungen, die sich u. a. in einer zunehmenden Heterogenität der Studierenden sowie einem wachsenden Individualisierungs- und Flexibilisierungsbedarf zeigen. Im Zuge der rasanten Entwicklung der Anwendungsfelder künstlicher Intelligenz (KI) liegt ein mögliches Potenzial, diesen Herausforderungen zu begegnen, in KI-basierten Assistenzsystemen, die Studierende in ihren Lernprozessen in den Modulen ihres Studiums inhaltlich individuell und unterstützend begleiten [1].

Seit dem Sommersemester 2025 testen wir an der OTH Amberg-Weiden mit OneTutor ein an der TU München entwickeltes KI-Tutoringsystem. Mit zunächst zehn Hochschullehrenden unserer vier Fakultäten haben wir OneTutor in Modulen verschiedener Inhaltsdomänen, von Anatomie über Mathematik und Psychologie bis hin zu Wirtschaftswissenschaften, einem breiten inhaltlichen Test unterzogen.

Um Nutzung und Wahrnehmungen durch Studierende und Lehrende systematisch zu erfassen, haben wir eine Begleitevaluation konzipiert, die zunächst an der OTH Amberg-Weiden eingesetzt wurde. Die Inhalte werden den Projektpartnern OneTutor und dem Bayerischen Forschungsinstitut für Digitale Transformation (bidt) zur Verfügung gestellt, um Erkenntnisfoki und Vorgehen stärker synchronisieren zu können. Dieser Beitrag verortet OneTutor im Rahmen computergestützter Systeme zur Lernprozessunterstützung und stellt das Konzept der Begleitevaluation sowie ausgewählte Ergebnisse vor.

## 2 OneTutor als computergestütztes KI-Tutoringsystem

Computergestützte Systeme für Lernprozesse finden seit mehreren Jahrzehnten verbreitete Anwendung. Sie können in „Computer-based training“ (CBT), „Computer-assisted (or -aided) instruction“ (CAI) sowie „Intelligent tutoring systems“ (ITS) unterschieden werden [2, S. 11], [3]. Mit dem Beginn der Nutzung von Computern zu Lernzwecken wurden CBT und CAI entwickelt [2]. Diese Systeme verlagerten die Lehr-Lern-Situationen in den digitalen Raum, ohne jedoch die Anforderungen aus Vorwissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie Bedürfnissen der Lernenden im Lernprozess ausreichend zu berücksichtigen. Mit der voranschreitenden Digitalisierung sind es ITS, die u. a. diese Aspekte flexibel berücksichtigen.

Hinsichtlich des Lernerfolgs zeigt sich, dass vor allem computergestützte, intelligente tutorielle Systeme (ITS) Lernprozesse deutlich positiv beeinflussen können [4]. In einer Meta-Analyse von Kulik und Flechter mit 63 Vergleichsstudien übertrafen in 92 % der Fälle die Lernerfolge der Experimentalgruppen mit ITS jene der Kontrollgruppen [3]. Der Median der erreichten Effektstärke, hier in Form von Glass Delta, wird mit 0.63 angegeben [3, S. 60]. Ein bedeutsames Merkmal von ITS ist hier, dass sie stärker individualisiert und adaptiv auf die Bedürfnisse der Lernenden eingehen können.

Im Rahmen von Lernprozessen leisten insbesondere Fragen von Studierenden einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis von Lerninhalten. Mit diesen Fragen kann eine intensive kognitive Auseinandersetzung einhergehen. Empirische Belege zeigen jedoch, dass Lernende eher selten Fragen stellen [5], [6]. Barrieren können dabei Ängste sein, wie die Befürchtung bloßgestellt zu werden oder keine gute Frage zu stellen. Anzunehmen ist, dass diese Barrieren bei einem computergestützten tutoriellen System nicht entstehen. Fraglich ist daher, inwieweit das **Frageverhalten** von Studierenden durch KI-Tutoringsysteme auf der Basis generativer KI profitieren kann.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Nutzung von KI-Tutoringsystemen ist die **Akzeptanz** seitens der potenziellen Nutzenden. Einen möglichen theoretischen Rahmen für Einflussfaktoren auf diese Akzeptanz bietet das Technologieakzeptanzmodell sowie seine Erweiterungen [7], [8], [9], [10]. Diesen Rahmen zugrunde legend stellt sich daher die Frage, inwiefern auch für KI-Tutoringsysteme die wahrgenommene Nützlichkeit, die Einfachheit der Nutzung und die Einstellung zur Nutzung für die Akzeptanz und damit für die Nutzung in Form des Einbezugs in Lernprozesse relevant sind.

Für die Art der Auseinandersetzung mit den Lerninhalten ist zudem die **Motivation** der Studierenden von Bedeutung [11]. In diesem Zusammenhang spielen sowohl ihr Interesse als auch ihr wahrgenommenes Kompetenzerleben, ihre Autonomie sowie das Ausmaß wahrgenommener Anspannung eine Rolle [11].

ITS sind als lernprozessbegleitende Hilfsmittel unabhängig von Ort und Zeit einsetzbar. Werden diese Systeme mit einer Chatfunktion versehen, ermöglichen sie ein interaktives Elaborieren von Inhalten wie Konzepten oder Zusammenhängen. Angelehnt an **Lernstrategien** kann hier ein Einsatz zur Wiederholung der Inhalte aus Lehr-Lern-Veranstaltungen, zur Klärung offener Fragen und Konzepte, zur Strukturierung der Inhalte, zum Erkennen wesentlicher Inhalte oder zur Bearbeitung komplexer Lernaufgaben unterschieden werden [12]. Fraglich ist, wann Studierende dazu auf eine KI-gestützte tutorielle Begleitung zurückgreifen (innerhalb und/oder außerhalb von Lehrveranstaltungen) und wozu konkret sie diese einsetzen.

Das KI-gestützte System OneTutor verspricht als generatives tutorielles System positive Wirkungen auf den Lernprozess [13]. Auf Basis der Prompts – also der Aufforderungen bzw. Fragen der Studierenden – generiert OneTutor in einer Chatfunktion Antworten, die auf die Inhalte der Lehr-Lern-Materialien der jeweiligen Lehrperson im entsprechenden Modul zurückgreifen. Zudem ermöglicht eine Assessmentfunktion (als Quizfunktion bezeichnet), dass Lehrende KI-generierte Fragen auf unterschiedlichem Schwierigkeitsniveau zur Lernerfolgskontrolle für die Studierenden bereitstellen können.

Mit Blick auf das Vorgenannte haben wir daher begleitend zum Einsatz von OneTutor in der Hochschullehre an der OTH Amberg-Weiden eine Evaluation konzipiert, die die Wahrnehmungen der Studierenden und der Lehrenden in den Blick nimmt. Folgenden **Forschungsfragen** gehen wir nach:

- 1 Welche Akzeptanzfacetten lassen sich im Hinblick auf OneTutor unterscheiden und wie ist die Akzeptanz bei Studierenden ausgeprägt?
- 2 Wie nutzen Studierende OneTutor und welche lernstrategischen Bezüge lassen sich ausmachen?
- 3 Wie nehmen Studierende ihr Frageverhalten in der Chatfunktion wahr?
- 4 Welche motivationsbezogenen Facetten zeigen sich bei Studierenden hinsichtlich OneTutor?
- 5 Wie nehmen Hochschullehrende OneTutor wahr?

### 3 Methode

Für die Begleitevaluation wurden ein Studierendenfragebogen und ein Kurzfragebogen für Lehrende konzipiert.

Der **Studierendenfragebogen** umfasste die Skalen

- **Frageverhalten und Fragebarrieren** (9 Items, *Cronbachs Alpha* = .79; Beispiele: Ich habe in Lehrveranstaltungen häufig viele Fragen, stelle aber nur wenige davon. | Durch OneTutor fällt es mir leicht, Fragen zu stellen.),
- **Akzeptanz von KI-Tutoringsystemen** (19 Items, *Cronbachs Alpha* = .88; Beispiele: KI-Anwendungen ersparen mir aufwändiges Suchen nach Informationen. | Auf die Antworten in der Chatfunktion kann ich mich verlassen. | KI ist mir suspekt.) (angelehnt an [8], [9], [14]),
- **Kurzskala intrinsische Motivation** (9 Items, *Cronbachs Alpha* = .86; Beispiele: Ich fand den Umgang mit OneTutor sehr interessant. | Ich konnte den Umgang mit OneTutor selbst steuern.) [adaptiert von 11] und
- **Einsatz von KI-Assistenzsystemen als Lernstrategie** (15 Items, *Cronbachs Alpha* = .91; Beispiele: Ich nutze KI-Assistenzsysteme ... in den Lehrveranstaltungen, um mir Grundbegriffe und Konzepte erklären zu lassen. | ... außerhalb der Lehrveranstaltungen zur Unterstützung bei der eigenständigen Bearbeitung komplexer Lernaufgaben.).

Die Antwortformate für die Items waren jeweils Likert-skaliert (stimme gar nicht zu, stimme eher nicht zu, teils-teils, stimme eher zu, stimme voll zu).

Der **Lehrendenfragebogen** enthielt Fragen zur

- **Wahrnehmung von OneTutor** (sieben geschlossene und drei offene Items, Beispiel: OneTutor unterstützt die Studierenden in ihren Lernprozessen. | Die Antworten der Chatfunktion entsprechen den Antworten, die ich als Dozierende/r geben würde.) und
- **Einbindung in die Lehre** (vier geschlossene und ein offenes Item, Beispiel: Ich habe in der Quizfunktion Aufgaben zur Wiederholung der Lerninhalte erstellt. | Ich habe die Studierenden dazu angeregt, OneTutor zu nutzen.).

OneTutor wurde in Lehrveranstaltungen verschiedener Studiengänge (Digital Healthcare Management, Elektro- und Informationstechnik, Geoinformatik, Industrie 4.0 Informatik, Ingenieurpädagogik, Medieninformatik, Medizintechnik und Physician Assistance) eingesetzt. Die Befragung fand gegen Ende des Sommersemesters 2025, im Juni, statt. An der Befragung beteiligten sich 60 Studierende (51 Bachelorstudierende, 9 o. A.; 25 männlich, 22 weiblich, 13 o. A.) und zehn Hochschullehrende.

### 4 Ausgewählte Ergebnisse

Die Bearbeitungszeit für den Studierendenfragebogen lag im arithmetischen Mittel bei 10,5 Min. (Min = 0,5 min, Max = 16,9 min) und für den Lehrendenfragebogen bei 3 Min. (Min = 2 min, Max = 5 min). Die Skalen wurden explorativen Faktorenanalysen (Rotation Varimax) unterzogen (Tabelle 1). Die Reliabilitäten sind insgesamt als gut einzuschätzen, müssen aber an zukünftigen, größeren Stichproben überprüft werden.

Tabelle 1: Überblick über Skalen und Reliabilitäten

Skala	Faktoren	Anzahl Items	Cronbachs Alpha	KMO	Erklärte Varianz
Akzeptanz von KI-Tutoringsystemen	4	19	.88	.750	69,7 %
Lernstrategisches Nutzungsverhalten	3	15	.91	.821	72,5 %
Frageverhalten und -barrieren	2	9	.79	.753	55,6 %
Kurzskala intrinsische Motivation	2	9	.86	.822	67,7 %

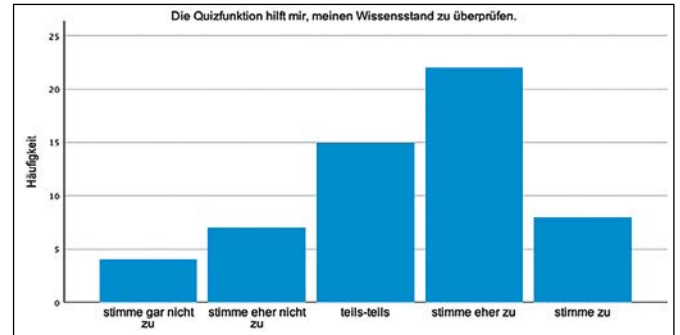
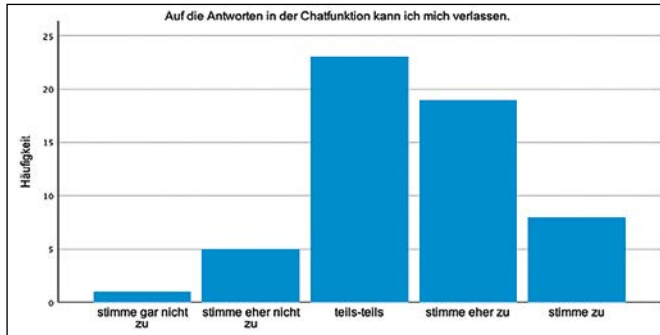
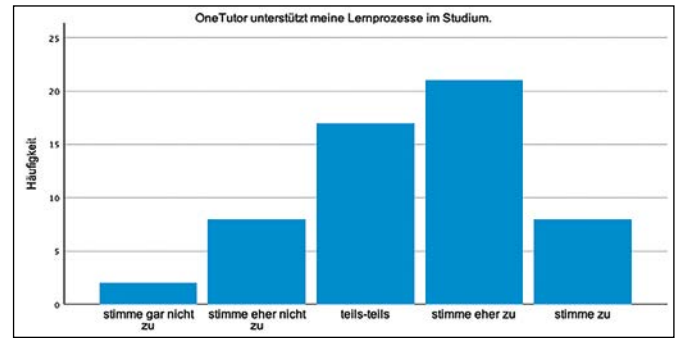
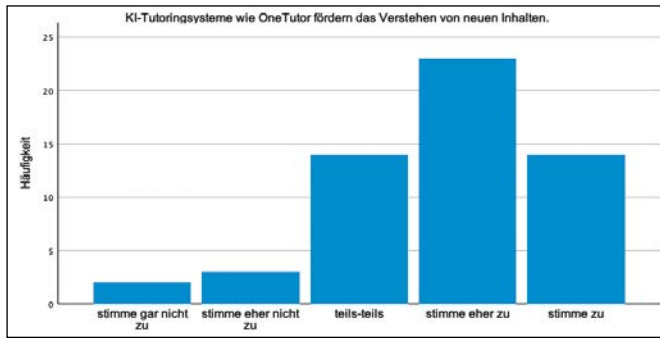


Abbildung 1: Ausgewählte Wahrnehmungen der Studierenden im Kontext der Akzeptanz von OneTutor

#### 4.1 Akzeptanz bei Studierenden

Inhaltlich repräsentieren die vier Faktoren die wahrgenommene Nützlichkeit von KI (Eigenwert = 6.168, Varianzaufklärung = 32.462; *Cronbachs Alpha*  $\alpha = .894$ ), die Einfachheit der Nutzung von OneTutor (Eigenwert = 3.756, Varianzaufklärung = 19.770;  $\alpha = .827$ ), den wahrgenommenen Nutzen von OneTutor für Lernprozesse (Eigenwert = 1.957, Varianzaufklärung = 10.302;  $\alpha = .856$ ) sowie die wahrgenommene Sicherheit (Eigenwert 1.366, Varianzaufklärung = 7.190;  $\alpha = .818$ ).

Am Beispiel der deskriptiven Daten (Abbildung 1) wird deutlich, dass 37 Studierende OneTutor als verständnisfördernd mit Blick auf die Lerninhalte sehen, 14 Studierende teils-teils und fünf Studierende (eher) nicht. Als Unterstützung für die Lernprozesse im Studium sehen OneTutor 29 Studierende, 17 teils-teils und 10 (eher) nicht. Dass die Chatfunktion (eher) verlässliche Antworten liefert, nehmen insgesamt 27 Studierende wahr, 23 teils-teils und sechs Studierende (eher) nicht. Als hilfreich für die Überprüfung des Wissensstandes sehen die Quizfunktion 30 Studierende, 15 teils-teils und 11 (eher) nicht.

#### 4.2 Lernstrategisches Nutzungsverhalten

Die 3-Faktorenlösung erklärt 72,5 % der Varianz und umfasst inhaltlich die Faktoren: kognitive Strategien innerhalb der LV (Eigenwert = 7.053, Varianzaufklärung = 47.624; *Cronbachs Alpha*  $\alpha = .912$ ), kognitive Strategien außerhalb der LV (Eigenwert = 5.501, Varianzaufklärung = 20.104;  $\alpha = .951$ ) sowie metakognitive Strategien (Eigenwert = 1.323, Varianzaufklärung = 8.821;  $\alpha = .416$ ). Bis auf den letzten Faktor, für den weitere Items erforderlich wären, ist die Reliabilität sehr gut.

Die deskriptiven Ergebnisse (vgl. exemplarisch Abbildung 2) untermauern, dass die Studierenden OneTutor vor allem außerhalb und nur zu einem kleineren Teil innerhalb der Lehr-Lern-Veranstaltungen nutzen, um Inhalte zu wiederholen, offene Fragen zu klären, sich Grundbegriffe und Konzepte erklären zu lassen, wesentliche Lerninhalte zu erkennen und Unterstützung bei der Bearbeitung komplexer Lernaufgaben zu erhalten.

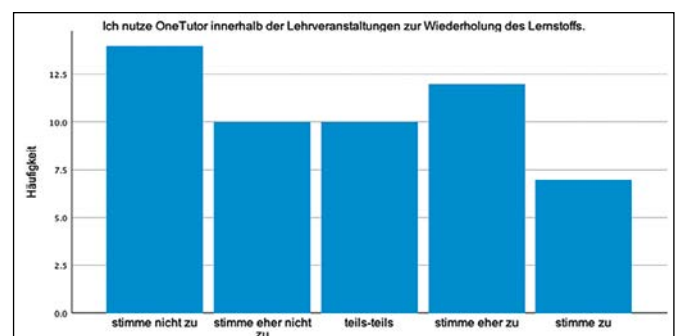
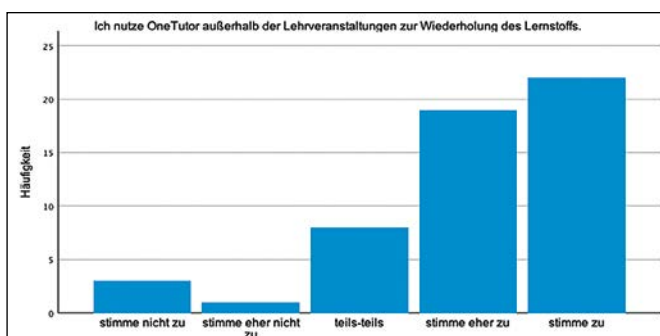


Abbildung 2: Ausgewählte Rückmeldung der Studierenden zur Nutzung von OneTutor

### 4.3 Frageverhalten

Inhaltlich repräsentieren die beiden Faktoren das „Frageverhalten in Lernprozessen und emotional-kognitive Barrieren“ (Eigenwert = 3.478, Varianzaufklärung = 38.644; *Cronbachs Alpha*  $\alpha = .669$ ) und das „selbst-regulative und technologiegestützte Frageverhalten“ (Eigenwert = 1.527, Varianzaufklärung 16.967;  $\alpha = .769$ ). Die hier genutzte Skala sollte jedoch weiterentwickelt, um geeignete Items ergänzt und an einer größeren Stichprobe geprüft werden.

Die deskriptiven Daten geben Hinweise auf Fragebarrieren, die u. a. darin bestehen, dass Studierende überlegen, ob die Frage gut ist oder Wert ist, gestellt zu werden (35 Studierende antworten hier zustimmend, 6 teils-teils, vgl. Abbildung 3). Im Vergleich dazu geben 25 Studierende an, dass es ihnen in OneTutor (eher) leichtfällt, Fragen zu stellen, 19 antworten mit teils-teils und 12 widersprechen dieser Aussage (eher).

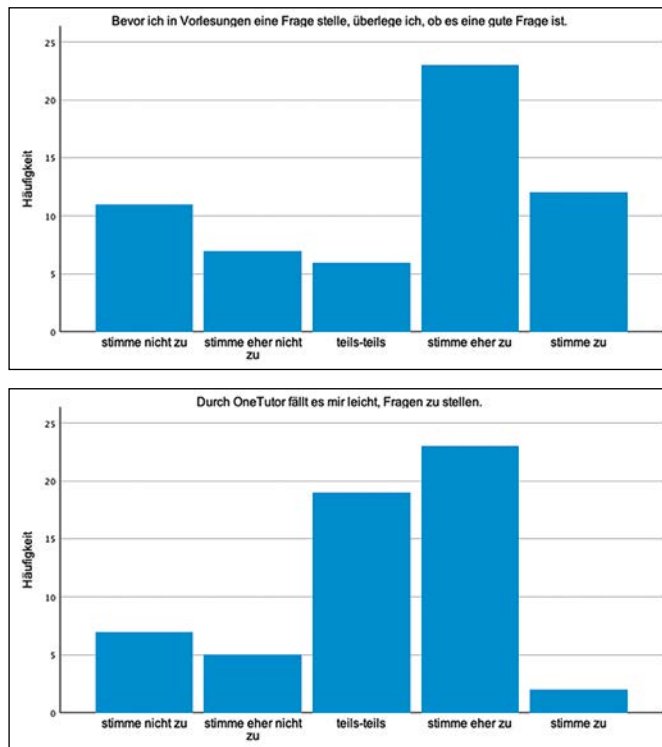


Abbildung 3: Ausgewählte Rückmeldungen der Studierenden zum Frageverhalten

### 4.4 Motivation

Die 2-Faktorenlösung repräsentiert inhaltlich die wahrgenommene Kompetenz und das Interesse (Eigenwert = 4.286, Varianzaufklärung = 47.624; *Cronbachs Alpha*  $\alpha = .875$ ) und die wahrgenommene Wahlfreiheit im Umgang mit OneTutor (Eigenwert = 1.809, Varianzaufklärung = 20.104;  $\alpha = .841$ ).

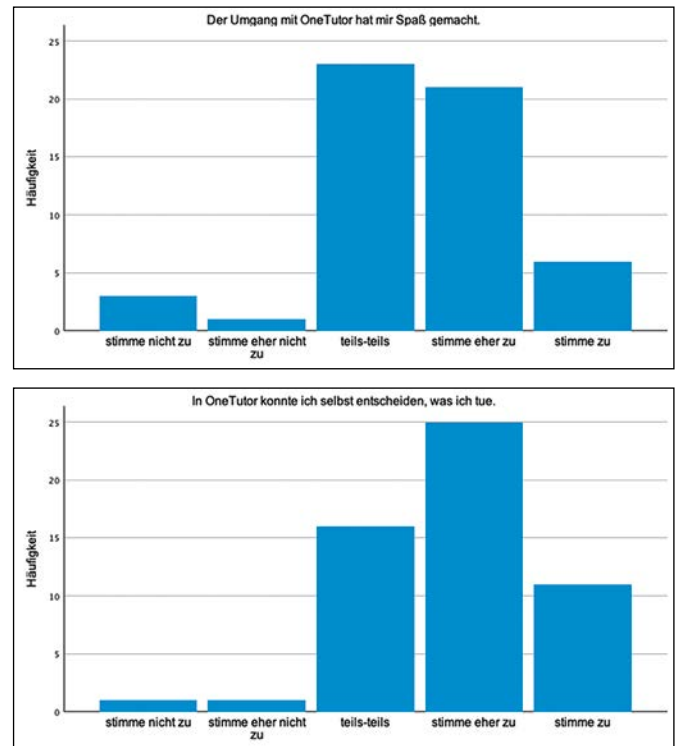


Abbildung 4: Ausgewählte Rückmeldungen der Studierenden im Kontext der Items zur Motivation

### 4.5 Wahrnehmungen der Lehrenden

Die Einschätzungen der Lehrenden in Bezug auf die Chatfunktion von OneTutor (Tabelle 2) zeigt, dass fünf Lehrende mit der Qualität der Antworten der Chatfunktion (eher) zufrieden sind, eine Person teils-teils und drei (eher) nicht. Die gleiche Verteilung zeigt sich in Bezug auf die Zustimmung zu der Aussage, dass die Antworten der Chatfunktion denen entsprechen, die die jeweiligen Hochschullehrenden geben würden. Mit der Qualität der Quizfunktion sind lediglich zwei Lehrende eher zufrieden, fünf teils-teils und drei (eher) nicht. Der Aussage, dass das Feedback in der Quizfunktion Hinweise auf Fehler und Lernbedarfe der Studierenden aufzeigt, stimmen fünf Lehrende (eher) zu, eine Person teils-teils und drei (eher) nicht. Zwei Personen können die Aussage nicht beurteilen bzw. haben die Quizfunktion nicht genutzt.

Vier von zehn Lehrenden haben OneTutor in konkrete Aufgabenstellungen auch während der Lehr-Lern-Veranstaltungen eingebunden. Acht von zehn Lehrenden geben an, ihre Studierenden dazu angeregt zu haben, OneTutor zu nutzen, um z. B. Verständnisschwierigkeiten zu beseitigen. Aus den Antworten auf die offenen Items wird deutlich, dass OneTutor noch nicht in jeder Domäne wünschenswerte Ergebnisse liefert (z. B. ist für Mathematik „das System noch nicht ausgereift genug“). Weitere Herausforderungen sehen die Lehrenden darin, dass die Qualität der Quizfragen noch „zu viel konkretisierende Handarbeit“ erfordert, die Tipps teils „zu nahe an der erwarteten Antwort liegen“, „keine Transferaufgaben gestellt werden“, „keine direkte Integration in Moodle“

Tabelle 2: Ausgewählte Wahrnehmungen der Lehrenden

		Lehre: Die Chatfunktion liefert Antworten, mit deren Qualität ich zufrieden bin.				Lehre: Die Antworten der Chatfunktion entsprechen den Antworten, die ich als Dozierende/r geben würde.			
		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	Stimme nicht zu	1	10	11,1	11,1	1	10	11,1	11,1
	Stimme eher nicht zu	2	20	22,2	33,3	2	20	22,2	33,3
	Teils-teils	1	10	11,1	44,4	1	10	22,2	44,4
	Stimme eher zu	3	30	33,3	77,8	4	40	44,4	88,9
	Stimme zu	2	20	22,2	100,0	1	10	11,1	100,0
	Gesamt	9	90	100,0		9	90	100,0	
Fehlend	Kann ich nicht beurteilen	1	10			1	10		
Gesamt		10	100			10	100		
		Lehre: Die Quizfunktion liefert Fragen, mit deren Qualität ich zufrieden bin.				Lehre: Das Feedback der Quizfunktion liefert den Studierenden Hinweise auf ihre Fehler bzw. Lernbedarfe.			
		Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente	Häufigkeit	Prozent	Gültige Prozente	Kumulierte Prozente
Gültig	Stimme nicht zu	2	20	20	20,0				
	Stimme eher nicht zu	1	10	10	30,0				
	Teils-teils	5	50	50	80,0	5	50	62,5	62,5
	Stimme eher zu	2	20	20	100,0	2	20	25,0	87,5
	Stimme zu					1	10	12,5	100,0
	Gesamt	10	100	100		8	80	100,0	
Fehlend	Kann ich nicht beurteilen					1	10		
	Habe ich nicht genutzt					1	10		
	Gesamt					2	20		
Gesamt		10	100	100		10	100		

möglich war und die Bedienung intuitiver sein sollte. Als positiv nehmen die Lehrenden aber das elaborierte Feedback auf die Freitext-Quizfragen, die Verweise auf konkrete Quellen und das „Konzept per se“ wahr. Zusätzlich wünschen sie sich auch für die (Single-) Multiple-Choice-Fragen ein elaboriertes Feedback für die Studierenden, eine deutlichere Unterscheidung der Schwierigkeitsgrade in Bezug auf die Quizfragen und eine Weiterentwicklung mit Blick auf momentan noch nicht optimal nutzbare (z. B. mathematische) Inhalte. Auf Basis des derzeitigen Standes geben sieben von zehn Hochschullehrenden an, OneTutor weiter nutzen zu wollen.

## 5 Kritische Würdigung und Ausblick

Um das Potenzial von KI-Tutoringsystemen in der Hochschullehre besser zu nutzen, bedarf es einerseits der Einbindung einer größeren Anzahl Lehrender, andererseits einer Weiterentwicklung des Systems auf Basis der Evaluationsergebnisse. Zunächst ist OneTutor daher in den nächsten Semestern mehr Lehrenden zugänglich zu machen. Eine größere inhaltliche Breite soll zudem die Voraussetzungen dafür schaffen, dass die Anwendungsmöglichkeiten weiter steigen sowie mit zunehmender Nutzung des Systems die Datenbasis erweitert und dadurch die Qualität der Antworten und des Feedbacks weiter verbessert werden kann.

### Referenzen:

- [1] G. Kestin, K. Miller, A. Klales, T. Milbourne und G. Ponti, „AI tutoring outperforms in-class active learning: an RCT introducing a novel research-based design in an authentic educational setting“, *Scientific Reports*, 15:17458, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97652-6>
- [2] J. Beck, M. Stern und E. Haugsjaa, „Applications of AI in education“, *Crossroads: The ACM Student Magazine for Students*, 3(1), 11-15, 1996. <https://doi.org/10.1145/332148.332153>
- [3] J. A. Kulik & J. D. Fletcher, „Effectiveness of Intelligent Tutoring Systems: A Meta-Analytic Review“, *Review of Educational Research*, 86(1), 42-78, 2016. <https://doi.org/10.3102/0034654315581420>
- [4] Ma, W., Adesope, O. O., Nesbit, J. C. und Liu, Q., „Intelligent tutoring systems and learning outcomes: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 106, 901-918, 2014. <https://doi.org/10.1037/a0037123>
- [5] E. Wuttke und J. Seifried, „Formen, Funktionen und Effekte sprachlicher Instruktion und Interaktion am Beispiel von Fragen und Feedback“, In: J. Kilian, B. Brouër und D. Lüttenberg (Hrsg.), *Handbuch Sprache in der Bildung*, de Gruyter, S. 346-361, 2016.

- [6] H. Pallesen und M. Hörnlein, „Warum Schüler\*innen keine Fragen stellen. Unterricht zwischen Sozialisation zur Fraglosigkeit und Bildungsanspruch“, In: D. Rumpf und S. Winter (Hrsg.), *Kinderperspektiven im Unterricht*, Springer, 11-22, 2019.
- [7] K. Sohn und O. Kwon, „Technology acceptance theories and factors influencing artificial Intelligence-based intelligent products“, *Telematics and Informatics*, 47, 101324, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2019.101324>.
- [8] F. D. Davis, „A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems: Theory and Results“ (Doctoral dissertation). Massachusetts Institute of Technology, 1986.
- [9] V. Venkatesh und F. D. Davis, „A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies“, *Management Science*, 46(2), 186-204, 2000. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.2.186.11926>.
- [10] F. Abdullah und R. Ward, „Developing a General Extended Technology Acceptance Model for E-Learning (GETAMEL) by analysing commonly used external factors“, *Computers in Human Behavior*, 56, 238-256, 2016.
- [11] M. Wilde, K. Bätz, A. Kovaleva und D. Urhahne, „Überprüfung einer Kurzskala intrinsischer Motivation (KIM)“, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften: ZfDN* 15, S. 31-45, 2009. <https://doi.org/10.25656/01:31663>
- [12] K.-P. Wild, „Individuelle Lernstrategien von Studierenden. Konsequenzen für die Hochschuldidaktik und die Hochschullehre“, In: *Beiträge zur Lehrerbildung* 23(2), 191-206, 2005. <https://doi.org/10.25656/01:13572>
- [13] K. Neumann, J. Kuhn und H. Drachler, „Generative Künstliche Intelligenz in Unterricht und Unterrichtsforschung – Chancen und Herausforderungen“, *Unterrichtswissenschaft*, 52, 227-237, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42010-024-00212-6>
- [14] M. Y. Jiang, M. S. Jong, W. W. Lau, Y. Meng, C. Chai und M. Chen, „Validating the General Extended Technology Acceptance Model for E-Learning: Evidence From an Online English as a Foreign Language Course Amid COVID-19“, *Frontiers in Psychology*, 12, Article 671615, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.671615>

### Projektpartner:

OneTutor GmbH, 80336 München

Bayerische Akademie der Wissenschaften (BAW) handelnd für Bayerisches Forschungsinstitut für Digitale Transformation (bidt), 80333 München

## KONTAKT



**Prof. Dr. habil. Mandy Hommel**

Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Vizepräsidentin Lehre, Didaktik und Professional Development  
Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik  
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23  
92224 Amberg

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



**Prof. Dr. Sandra Rebolz**

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

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



**Prof. Dr. Nada Sissouno**

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

[n.sissouno@oth-aw.de](mailto:n.sissouno@oth-aw.de)

# Hey ALEX, teach me to sell this pen - Ergebnisse eines lehrintegrierten Forschungsprojekts zum Einsatz GenKI-basierter Avatare für Verkaufstrainings

## Zusammenfassung

Im Pflichtmodul „Research Project“ des B.Sc. Digital Technology and Management durchliefen 22 Studierende den kompletten Forschungszyklus an einem hochaktuellen Praxisbeispiel: dem Einsatz generativer KI-Avatare (ALEX) für szenariobasierte Verkaufstrainings. Fünf Teams formulierten Teilfragestellungen zu Machbarkeit, Wirksamkeit sowie Möglichkeiten und Grenzen und führten hierzu empirische Studien durch. Die Arbeiten untersuchten u. a. (i) Konfidenzeffekte bei bereits trainierten vs. erstmaligen Nutzer:innen, (ii) den Einfluss kultureller Passung (Kommunikationsstil, Formalität) auf Trainingserleben und Anwendungssicherheit, (iii) demografische Unterschiede (Alter, Geschlecht, Kultur) in unmittelbaren Verbesserungen und (iv) die Wirkung iterativer Prompt-Verfeinerung auf die Dialogqualität eines Käufer-Avatars. Die Ergebnisse deuten auf realistische, skalierbare Einsatzmöglichkeiten hin: Konfidenzgewinne sind plausibel, kulturelle Passung fördert v. a. Akzeptanz und Anwendungszuversicht, demografische Effekte sind gering und gezieltes Prompt-Engineering steigert Realismus und Value-Based-Selling-Ausrichtung.

*Schlagwörter: Generative KI; Avatar; Vertriebstraining; Value-Based Selling; Prompt Engineering*

## Abstract

In the mandatory “Research Project” course of the B.Sc. Digital Technology and Management, 22 students completed a full research cycle on generative-AI buyer avatars (ALEX) for scenario-based sales training. Five teams investigated feasibility and effectiveness: (i) confidence effects for previously trained vs. first-time users, (ii) cultural fit (communication style, formality) and its impact on training perceptions and confidence to apply, (iii) demographic differences (age, gender, culture) in immediate improvement, and (iv) effects of iterative prompt refinement on avatar dialogue quality. Findings point to realistic, scalable use: confidence gains appear plausible, cultural fit primarily boosts acceptance and application confidence, demographic effects are small, and prompt engineering improves realism and alignment with value-based selling.

## Einleitung und Hintergrund

Vertriebsschulungen sind ein kostenintensiver Schlüsselfaktor für Verkaufserfolg [1] und die Leistungsfähigkeit von Vertriebsteams [2], insbesondere, wenn man die verlorene Arbeitszeit mit einbezieht. Traditionelle Präsenzs Schulungen und insbesondere Rollenspielübungen gehören zwar nach wie vor zu den effektivsten Methoden zur Entwicklung zwischenmenschlicher Fähigkeiten, die für den Aufbau von Beziehungen und die Schaffung von Mehrwert für Kunden unerlässlich sind [3]. Sie lassen sich jedoch nur schlecht skalieren, erfordern erhebliche

Ressourcen und sind anfällig für Schwankungen in der Qualität der Trainer. Digitale Alternativen wie E-Learning-Module und virtuelle, von Trainern geleitete Programme erweitern zwar die Reichweite und senken die Kosten, aber oft fehlt ihnen die praktische Komponente, die für die Entwicklung von Beziehungsfähigkeiten im Vertrieb erforderlich ist [4], [5],[6]. KI-basierte Sales-Coaches punkten mit Skalierbarkeit und Datenauswertung, bringen aber Grenzen mit Blick auf Proaktivität, Datenschutz und die Art der Rückmeldung mit sich [7].

## Kombinierte GenKI-basierte Avatare als Wegbereiter für effektives und effizientes Training

Vor diesem Hintergrund bietet generative KI (GenKI) einen interessanten neuen Weg. [8] Tools, die auf großen Sprachmodellen basieren und mit sprachbasierten Schnittstellen und Animationen kombiniert werden, können Avatare steuern, die menschliche Dialoge in Echtzeit simulieren. Für Verkaufstrainings sind solche Avatare besonders vielversprechend, da sie die adaptiven Eigenschaften von KI mit der zwischenmenschlichen Spontanität von Rollenspielen verbinden. [9] Sie können es Unternehmen ermöglichen, die Kosten- und Skalierungsbeschränkungen traditioneller Methoden zu überwinden, ohne dabei vollständig auf das für den Erfolg entscheidende Erfahrungslernen zu verzichten.

Konkret wurde im Rahmen eines breiter angelegten Forschungsprojekts ein hochrealistischer, sprachfähiger KI-Avatar namens ALEX (**A**dvanced **L**earning and **E**ngagement **eX**pert) entwickelt, der menschliche Interaktion nicht nur in verbalen Inhalten, sondern auch in Tonfall, Emotionen und kulturellen Nuancen simuliert – Funktionen, die darauf ausgelegt sind, die oft mit KI assoziierte „Kälte“ zu reduzieren. Mithilfe detaillierter Prompts und Zusatzinformationen ermöglicht er skalierbares Erfahrungslernen, indem er natürliche Echtzeitdialoge in immersiven Rollenspielen mit der Effizienz automatisierter Bereitstellung kombiniert. Durch dynamische Szenarien und Bereitstellung von sofortigem Feedback bewahrt das GenKI-gestützte Avatar-Training die wichtigsten Vorteile des persönlichen Coachings, eliminiert aber gleichzeitig dessen Trainer- und Reisekosten, Zeit- und Ortsgebundenheit sowie Varianzen in der Qualität der Trainer. Die KI übernimmt Aufgaben, die normalerweise auf mehrere Personen verteilt sind – Beobachter, Analyst, Fachexperte und Feedbackgeber –, wodurch die Überlastung der Trainierenden reduziert und einheitliche Standards gewährleistet werden. Durch die Nutzung der überlegenen Datenverarbeitung großer Sprachmodelle liefert das System zeitnahes, detailliertes, an das Qualifikationsniveau angepasstes und skalierbares Feedback. Die Lernenden bleiben durch lebens echte Avatare motiviert, die personalisierte Anleitung und soziale Präsenz bieten – Eigenschaften, die seit jeher als Vorteil menschlicher Coaches angesehen werden. Dies trägt dazu bei, die Nachteile des E-Learnings wie mangelndes Engagement und selbstbestimmtes Tempo zu mindern, während gleichzeitig Vertrauen aufgebaut, Widerstände abgebaut und die Auszubildenden bei der Überwindung von Lernbarrieren unterstützt werden. Das über eine URL bereitgestellte Training ist weltweit zugänglich, rund um die Uhr verfügbar und in hohem Maße skalierbar, was eine konsistente Schulungsdurchführung, Just-in-Time-Lernen und eine größere Reichweite bei minimalen Kosten ermöglicht.

Eine erste Studie [10], die mittels experimentellem Between-Subjects-Design avatarbasiertes Verkaufstraining mit einem persönlichen Verkaufstraining im Hinblick auf Vorher-Nachher-Test der Fähigkeiten im wertorientierten Verkauf (VBS) [11], [12] sowie subjektive Bewertungen auf der Grundlage des Technology Acceptance Models (TAM) [13] und des Learning Evaluation Frameworks von Kirkpatrick [14] verglich, zeigte, dass das avatarbasierte Training in allen gemessenen Dimensionen, darunter Realismus, Zufriedenheit, wahrgenommene Nützlichkeit, Benutzerfreundlichkeit und Nutzungsabsicht, insgesamt positiv bewertet wurde und zu einer Verbesserung der Fähigkeiten im wertorientierten Verkauf führte. Allerdings waren die Bewertungen in allen Dimensionen – mit Ausnahme der Benutzerfreundlichkeit – deutlich niedriger als bei der persönlichen Schulung. Dies unterstreicht sowohl das Potenzial als auch die derzeitigen Einschränkungen des GenAI-basierten Formats, insbesondere in seiner frühen Entwicklungsphase.

Trotz dieser Lücken, die mit dem Fortschritt der Technologie selbst und dem Wissen über ihre Anwendung schnell geschlossen werden könnten, zeigt der Avatar-Ansatz ein starkes Potenzial für weitere Entwicklungen und Anwendungen.

### Zielsetzung

Die grundsätzliche Eignung, Effektivität und Effizienz angenommen, eröffnen sich weiterführende Forschungsfragen in diversen Richtungen, etwa die Effektivität und Effizienz insbesondere bei Wiederholung des Trainings, dessen Kultursensitivität, aber auch eher technische Fragestellungen des Promptengineerings. Ziel dieses Forschungsprojekts war es dabei, Studierende einzelne Aspekte dieser realen aktuellen Forschungsfragestellungen untersuchen zu lassen, ohne dabei den Anspruch zu haben, diese abschließend und in großer Tiefe zu beantworten, sondern vielmehr den Forschungsprozess im Detail zu durchlaufen und Qualitätskriterien und Herausforderungen in der Durchführung nicht nur zu erkennen, sondern auch am Beispiel zu verstehen und zu adressieren.

### Methodik

Im Sommersemester 2025 bearbeiteten 22 Studierende im Pflichtmodul „Research Project“ fünf Teilstudien mit dem GenKI-Avatar ALEX. Es kamen vier Designs zum Einsatz: (i) ein Between-Subjects-Vergleich „ALEX-erfahren vs. neu“ über sieben Konfidenzdimensionen [15]; (ii) Korrelationsanalysen zu kultureller Passung (Kommunikationsstil, Formalität) und Outcomes wie Recall, Confidence-to-Apply und Weiterempfehlung [16]; (iii) Untersuchung von potentiellen demografischen Moderatoren (Alter, Geschlecht, Kultur) in einem 2-tägigen Prä-/Post-Design [17]; sowie (iv) eine Design-Based-Research-Stu-

die zur iterativen Prompt-Verfeinerung mit rubrikbasierter Bewertung [18].

Zum Einsatz kam ALEX, eine Next.js-basierte Anwendung, die mehrere LLMs über APIs integriert, um interaktive Funktionen zu ermöglichen. Sie nutzt die API von Google Gemini (Gemini 1.5 Flash) als zentralen Logikcontroller, und koordiniert das Verhalten der Anwendung, Szenarien, Simulationen und Feedback durch dynamisch generierte Prompts sowie Sprach-zu-Text-Verarbeitung, während die API des HeyGen Streaming Avatar SDK Echtzeit-Avatar-Animationen und Text-zu-Sprache-Verarbeitung bereitstellt, die auf Benutzereingaben reagieren und so ein immersives, dialogorientiertes Erlebnis schaffen, das realen Charakteren nachempfunden ist und verschiedene Szenarien und emotionale Zustände unterstützt.

## Ergebnisse

Im Vergleich ALEX-erfahren ( $n = 3$ ) vs. neu ( $n = 7$ ) zeigten sich konsistent höhere Mittelränge zugunsten der Erfahrenen über mehrere Konfidenzfacetten; die Unterschiede blieben aufgrund der kleinen Stichprobe statistisch nicht signifikant (z. B. ANOVA  $p > 0,05$  über alle sieben Dimensionen) [15]. Die Studie zur kulturellen Passung fand, dass wahrgenommene Kommunikationsähnlichkeit signifikant mit der Anwendungszuversicht korrelierte, während formale Passung die Weiterempfehlung – insbesondere innerhalb kulturell ähnlicher Peers – erhöhte; reine Recall-Effekte waren schwächer [16]. In der Demografieanalyse ( $N = 20$ ) zeigte sich: Alter hing nur mit wahrgenommenem Aufwand zusammen, nicht mit unmittelbaren Konfidenz- oder Fähigkeitsgewinnen; Geschlechtseffekte waren nicht signifikant, lediglich bei Feedbacknutzung zeigte sich ein Trend [17]. Schließlich verbesserte iterative Prompt-Iteration die Gesprächsqualität des Avatars deutlich: spätere Versionen reduzierten vorzeitige Preisdebatten, stärkten Bedarfserkundung und variierten Tonalität sowie Pausen natürlicher; über-regulierte Prompts minderten Realismus und Lernwert [18].

## Diskussion

Die fünf Teilstudien belegen die Machbarkeit und didaktische Nutzbarkeit von GenKI-Avatoren für Value-Based-Selling-Trainings. Konfidenzgewinne erscheinen plausibel, sind aber aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht sicher nachweisbar. Kulturelle Passung wirkt als affektiv-sozialer Verstärker (Anwendungszuversicht, Empfehlungsbereitschaft), weniger als reiner Wissenshebel. Prompt-Engineering erweist sich als kosteneffizienter Hebel zur Steigerung von Realismus und Wertorientierung, wenn Struktur und Flexibilität balanciert werden. Praktisch empfehlen sich konfigurierbare kulturelle Profile, größere Stichproben mit objektiven Leistungsmaßen sowie Hybrid-Evaluationen aus automatisierter Rubrikbewertung und menschlicher Review.

## Fazit und Ausblick

GenKI-Avatare wie ALEX unterstützen skalierbares, szenariobasiertes Verkaufstraining. Für robuste Wirksamkeitsnachweise sind längsschnittliche Designs mit größeren, diverseren Stichproben erforderlich. Langzeitstudien und die Einbettung in reale Trainingskohorten sind naheliegende nächste Schritte.

Lehrintegrierte Forschung trug in diesem Projekt nachweislich positiv zur Qualität der Ausbildung sowie zur Motivation der Studierenden im Hinblick auf wissenschaftliches Arbeiten bei. Sie förderte die Bereitschaft, sich mit aktueller Forschung und wissenschaftlicher Literatur auseinanderzusetzen, und schärfte das Bewusstsein für die Bedeutung eines methodisch sauberen Vorgehens. Studierende entwickeln dabei Kompetenzen in der korrekten Datenerhebung, -analyse und -interpretation sowie im gezielten Filtern relevanter Ergebnisse sowie das selbstbewusste Vertreten eigener Forschungsergebnisse und sowohl die mündlich als auch schriftlich prägnante Präsentationsfähigkeit.

## Offenlegung KI-Einsatz

Der Avatar nutzt wie oben geschildert diverse GenKI-Modelle. Zur rubrikbasierten Bewertung wurden LLM-gestützte Erstbewertungen mit Team-Validierung kombiniert. Die Berichte der Studierenden wurden mit KI-Assistenz redaktionell konsolidiert.

---

## Referenzen:

- [1] G. A. Churchill, N. M. Ford, S. W. Hartley, and O. C. Walker, "The determinants of salesperson performance: A meta-analysis", *Journal of Marketing Research*, vol. 22, no. 2, pp. 103-118, 1985.
- [2] W. L. Cron and J. Singh, "Salesperson selection, training, and development: Trends, implications, and research opportunities", *Journal of Personal Selling & Sales Management*, vol. 25, no. 2, pp. 123-136, 2005.
- [3] R. C. Erffmeyer, K. R. Russ, and J. F. Hair, "Traditional and high-tech sales training methods", *Industrial Marketing Management*, vol. 21, no. 2, pp. 125-131, 1992.
- [4] S. S. Singh, R. Sen, and S. Borle, "Online training of salespeople: Impact, heterogeneity, and spillover effects", *Journal of Marketing Research*, vol. 59, no. 1, pp. 230-249, 2022.
- [5] K. Russ, J. Hair, R. Erffmeyer, and D. Easterling, "Usage and perceived effectiveness of high-tech approaches to sales training", *Journal of Personal Selling & Sales Management*, vol. 9, no. 1, pp. 46-54, 2013.
- [6] D. Deeter-Schmelz and K. Kennedy, "A global perspective on the current state of sales education in the college curriculum", *Journal of Personal Selling & Sales Management*, vol. 31, pp. 55-75, 2011.
- [7] X. Luo, M. S. Qin, Z. Fang, and Z. Qu, "Artificial intelligence coaches for sales agents: Caveats and solutions", *Journal of Marketing*, vol. 85, no. 2, pp. 14-32, 2021.
- [8] F. F-H. Nah, R. Zheng, J. Cai, K. Siau, and L. Chen, "Generative AI and ChatGPT: Applications, challenges, and AI-human collaboration", *Journal of Information Technology Case and Application Research*, vol. 25, no. 3, pp. 277-304, 2023.
- [9] M. Sharples, "Towards social generative AI for education: Theory, practices and ethics", *Learning: Research and Practice*, vol. 9, no. 2, pp. 159-167, 2023.
- [10] J. Heigl, H. Huttelmaier, M. Muci, and T. Lemberger, "GenAI-Based Avatars in Role-Play to Improve Effectiveness and Efficiency in Salesforce Training – Insights from an Initial Experiment", in *Proc. 41st IMP Conf.*, Gothenburg, Sweden, 2025.
- [11] M. Kienzler, D. Kindström, and T. Brashear-Alejandro, "Value-based selling: A multi-component exploration", *Journal of Business & Industrial Marketing*, vol. 34, no. 2, pp. 360-373, 2019.
- [12] H. Terho, A. Haas, A. Eggert, and W. Ulaga, "It's almost like taking the sales out of selling — towards a conceptualization of value-based selling in business markets", *Industrial Marketing Management*, vol. 41, no. 1, pp. 174-185, 2012.
- [13] F. D. Davis, "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology", *MIS Quarterly*, vol. 13, no. 3, pp. 319-340, 1989.
- [14] D. L. Kirkpatrick, *Evaluating Training Programs: The Four Levels*. San Francisco, CA, USA: Berrett-Koehler, 1994.
- [15] K. F. Ndipisiri, S. Khurramov, S. Özova, V. Vahidov, and K. M. A. M. Mehanna, "Can GenAI-assisted communication training enhance confidence levels among sales trainees over time", *Research Project Report*, OTH Amberg-Weiden, 2025.
- [16] E. Alobwede, I. Ayodele, Y. Kumar, P. N. Amin, and E. Njume, "The role of cultural similarity in AI-based sales negotiation training", *Research Project Report*, OTH Amberg-Weiden, 2025.
- [17] D. Çetinel, M. Patil, and Y. Yu, "The difference in participants' performance based on various ages, genders, and cultural backgrounds when training with GenAI-driven simulation in improving value-based sales skills", *Research Project Report*, OTH Amberg-Weiden, 2025.
- [18] P. Bösel, A. Ali, M. Bakhtiari, and M. Reichl, "Refining the Buyer: Iterative Prompt Design for AI-Driven Value-Based Sales Training Simulations", *Research Project Report*, OTH Amberg-Weiden, 2025.

## KONTAKT



**Prof. Dr. Julia Heigl**

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

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



**Prof. Dr. Hannes Huttelmaier**

Technische Hochschule  
Würzburg-Schweinfurt  
Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen  
Münzstraße 12  
97070 Würzburg

[hannes.huttelmaier@thws.de](mailto:hannes.huttelmaier@thws.de)

# KI-basierte Lebensdauervorhersage von additiv gefertigten AlSi10Mg-Bauteilen unter Berücksichtigung des Eigenerwärmungseffekts und der Position auf der Bauplattform

## Zusammenfassung

In dieser Studie wurde das Ermüdungsverhalten von AlSi10Mg-Strukturen unter zyklischer Belastung untersucht. Aus dieser weit verbreiteten Aluminiumlegierung wurden durch additive Fertigung mit der Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)-Technologie geeignete Probenkörper gefertigt. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem Einfluss der Position innerhalb der Bauplattform auf die Streuung der Lebensdauer. Mehrere Chargen von Proben, gefertigt unter identischen Prozessbedingungen und mit der gleichen Wärmebehandlung, wurden miteinander verglichen, um einen Zusammenhang zwischen der Ermüdungslebensdauer und der Druckposition herzustellen. Darüber hinaus wurde die thermische Reaktion während der zyklischen Belastung (Eigenerwärmungseffekt) gemessen, um die Anwendung von Modellen zur Vorhersage der Ermüdungslebensdauer zu unterstützen. Verschiedene Modelle auf Basis künstlicher Intelligenz wurden angewandt, um die Ermüdungslebensdauer anhand von Faktoren wie Druckposition, thermischer Reaktion während der Belastung und Lastamplitude vorherzusagen. Die Modelle wurden anschließend miteinander verglichen und vielversprechende Ergebnisse wurden erzielt.

## Abstract

This study investigates the fatigue behavior of AlSi10Mg samples subjected to cyclic dynamic loading. The samples were additively manufactured from AlSi10Mg aluminum alloy using Laser Power Bed Fusion (L-PBF) technology. The primary focus is on how the printing position on the platform influences the variability in fatigue life. Multiple batches of samples, produced under identical printing conditions and heat treatments, were compared to establish a relationship between fatigue life and printing position. Additionally, the thermal response during cyclic loading (self-heating effect) was measured to support the application of fatigue life prediction models. Various models utilizing artificial intelligence were developed to predict fatigue life based on factors such as printing position, thermal response during loading, and load amplitude. The models were subsequently compared, yielding promising results.

## 1 Einleitung

Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem 3D-Objekte direkt aus einem Pulvermaterial nach der Vorlage eines CAD-Modelles aufgebaut werden. AlSi10Mg, eine häufig verwendete Aluminiumlegierung im L-PBF-Verfahren, ist aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften – darunter eine moderate Festigkeit, ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit und überlegene Wärmeleitfähigkeit – besonders in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt sowie im Motorsport weit verbreitet.

In jüngeren Studien wurden verschiedene Aspekte von AlSi10Mg im L-PBF-Verfahren untersucht, wie z. B. die Optimierung der Druckparameter, die Bauteilorientierung und deren Einfluss auf die Ermüdungslebensdauer. Während den Pulvereigenschaften und der Mikrostruktur große Aufmerksamkeit gewidmet wurde, gibt es nur wenige Arbeiten, die sich direkt mit der Ermüdungsfestigkeit befassen.

Ermüdung ist ein bekanntes Phänomen, das oft für strukturelles Versagen in technischen Anwendungen verantwortlich ist – häufig plötzlich und ohne Vorwarnung, was



ben unter variierenden Lastamplituden getestet wurden, um vollständige S-N-Kurven zu erstellen. Der Einfluss der Druckposition auf die Ermüdungslebensdauer wurde im Anschluss analysiert.

Die Ergebnisse für die ausschließlich der Druckposition vorbehaltene Plattform waren wie folgt:

- Bei einer Spannungsamplitude von 130 MPa betrug die durchschnittliche Ermüdungslebensdauer 14.376 Lastzyklen mit einer logarithmischen Standardabweichung (SlogN) von 0,063. Unter Annahme einer 50%-Versagenswahrscheinlichkeit wurde das Lebensdauerband mittels Gaußscher Verteilung auf 80 % erweitert, was zu einer sicheren Ermüdungslebensdauer von 12.728 Zyklen führte. Proben mit kürzerer Lebensdauer galten als Ausreißer.
- Bei einer Spannungsamplitude von 70 MPa lag die durchschnittliche Lebensdauer bei 261.621 Zyklen mit SlogN = 0,191. Der Grenzwert für Ausreißer wurde hier auf 180.730 Zyklen festgelegt.

Die Markierung der Proben basierend auf diesen Grenzwerten zeigte, dass sich die Ausreißer überwiegend auf der linken Seite der Bauplattform befanden (nahe dem Auslass der Schutzgasatmosphäre aus der Druckkammer), was den Einfluss der Druckposition auf die Ermüdungslebensdauer im 80%-Wahrscheinlichkeitsband der S-N-Kurve bestätigt. Diese Proben wurden in Abbildung 1 mit einem roten Kreuz markiert.

Die vollständige S-N-Kurve wurde für die Studie erstellt, jedoch wurden die Ausreißer gezielt analysiert – insbesondere für die Serie, die der Druckposition gewidmet war. Dies ermöglichte eine fokussierte Untersuchung des Einflusses der Druckposition auf die Ermüdungslebensdauer und offenbarte Unstetigkeiten im Ermüdungsverhalten, die in einer allgemeinen S-N-Kurvenanalyse möglicherweise verborgen geblieben wären (siehe Abbildung 2 – Datenpunkte).

### 2.3 Vorhersage der Ermüdungslebensdauer mittels künstlicher Intelligenz

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) erfolgte, um vier voneinander unabhängige Merkmale zu kombinieren. Das erste ist die Spannungsamplitude des Ermüdungstests, welche die führende Eingangsgröße darstellt. Das zweite und dritte Merkmal sind die X- und Y-Position der Probe auf der Bauplattform. Das vierte Merkmal ist die stabilisierte Temperatur in Phase 2 des Eigenerwärmungseffekts, wie ausführlich in [1] beschrieben. In dieser Arbeit wurden auch die für die Lebensdauer Vorhersage verwendeten Daten nach der Methode von Fargione [2] verwendet.

Der vollständige Datensatz umfasste 122 Proben. Davon wurden 70 % zum Trainieren des Modells, 15 % zur Modellbewertung (Testdaten) und weitere 15 % zur

Modellvalidierung verwendet. Zusätzlich wurden 22 neue Proben gefertigt, getestet und zur weiteren Validierung eingesetzt.

Verschiedene Machine-Learning-Modelle (ML) wurden auf die Daten trainiert:

- Aus der Klasse der linearen Modelle: Lineare Regression, Ridge und Lasso
- Aus der Gruppe der baum-basierten Modelle: Decision Tree, Random Forest, Extra Trees und Gradient Boosting
- Zusätzlich wurde auch der Algorithmus KNeighbors getestet.

Da viele verschiedene Modelle berücksichtigt wurden, erfolgte eine Hyperparameter-Optimierung für alle Modelle mithilfe von GridSearchCV [5] aus der scikit-learn-Bibliothek aufgrund ihrer einfachen Anwendung und breiten Einsetzbarkeit.

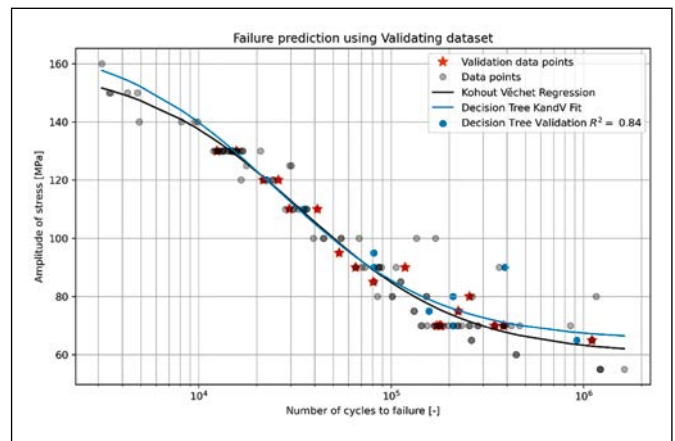


Abbildung 2: Die K&V-Kurve für alle Datenpunkte ist mit grauen Kreisen markiert, während Validierungsdatenpunkte durch rote Sterne dargestellt sind. Das am besten funktionierende Modell, der Entscheidungsbaum, wird anhand seiner entsprechenden K&V-Kurve mit den Validierungsdatenpunkten verglichen.

Nach dem Training wurden die Modelle anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  bewertet. Falls die  $R^2$ -Werte gleich waren, wurde als sekundäres Kriterium der mittlere quadratische Fehler (MSE) auf dem Testdatensatz herangezogen. Von den acht Modellen wurden die drei leistungsstärksten ausgewählt: Random Forest, KNeighbors und Extra Trees. Die K&V-Kurve für das leistungsstärkste Modell sowie die Originaldaten sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Entscheidungsbaum-Modell erwies sich als das beste Modell mit einem  $R^2$ -Wert von 0,84 und einem MSE von 0,09. Es wurde außerdem eine Analyse der Merkmalswichtigkeit durchgeführt. Wie erwartet ist die Spannungsamplitude mit 76 % das wichtigste Merkmal, gefolgt von der stabilisierten Temperatur mit 20 % und der Position der Probe auf der X-Achse mit 4 %. Die Vorhersage der Ermüdungslebensdauer zeigte sich unabhängig von der Position auf der Y-Achse.

### 3 Ausblick

Diese Studie zeigt, dass die Druckposition – ausschließlich entlang der X-Achse – die Ermüdungslebensdauer von AlSi10Mg-Proben, die mittels L-PBF hergestellt wurden, beeinflusst, während die Y-Achse nur eine minimale Auswirkung hat. Maschinelle Lernmodelle, darunter Random Forest und Entscheidungsbaum, sagten die Ermüdungslebensdauer effektiv auf Basis von Variablen

wie Spannungsamplitude, Druckposition und stabilisierter Temperatur voraus. In zukünftigen Arbeiten werden sowohl die Datensätze erweitert als auch neue Merkmale integriert, um die Vorhersagegenauigkeit durch fortgeschrittene Techniken wie Optuna weiter zu verbessern. Damit können die Einsatzgrenzen von 3D-gedruckten Komponenten für anspruchsvolle Einsatzgebiete mit ausgeprägter dynamischer Beanspruchung effizienter abgeschätzt werden.

---

#### Referenzen:

- [1] Matušů, M., Džuberová, L., Papuga, J., Rosenthal, J., Šimota, J., Beránek, L., Fatigue analysis and heat treatment comparison of additively manufactured specimens from AlSi10Mg alloy, International Journal of Fatigue, 2024, pp. [online]. ISSN 0142-1123, doi:10.1016/j.ijfatigue.2024.108357.
- [2] Matušů, M., Šimota, J., Papuga, J., Rosenthal, J., Beránek, L., Costa, P., Bumba, F., Reis, L., Estimation of the S-N curve from limiting energy for additively manufactured specimens from AlSi10Mg, Authorea [online], 2024. doi:10.22541/au.171783141.12775708/v1.
- [3] La Rosa, G., Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components, International Journal of Fatigue, 2000, 22(1), 65-73. ISSN 0142-1123, doi:10.1016/S0142-1123(99)00088-2.
- [4] He, L., Wang, Z., Akebono, H., Sugeta, A., Machine learning-based predictions of fatigue life and fatigue limit for steels, Journal of Materials Science & Technology, 2021, 90, 9-19. ISSN 1005-0302, doi:10.1016/j.jmst.2021.02.021.
- [5] Pedregosa, F., et al., Scikit-learn: Machine learning in Python, The Journal of Machine Learning Research, 2011, 12, 6

#### Projektpartner:

Czech Technical University in Prague (CTU), Fakultät Maschinenbau, Abteilung für Mechanik, Biomechanik und Mechatronik, CZ-160 00 Prague 6 - Dejvice

#### Fördergeber:

Unterstützung vom tschechischen Ministerium für Bildung, Jugend und Sport (Projekt LUABA22071), von der Bayerisch-Tschechischen Hochschulagentur (Projekt BTHA-JC-2022-30), von der Förderagentur der Tschechischen Technischen Universität in Prag (Projekt SGS23/156/OHK2/3T/12) und von ESIF, dem Europäischen Struktur und Investitionsfonds und vom Zentrum für fortgeschrittene Luft- und Raumfahrt (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_019/0000826) der Fakultät für Maschinenbau der Tschechischen Technischen Universität in Prag erhalten. Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der OTH Regensburg als Teil der Cluster-KmK-Initiative mit Fokus auf der Konstruktion mit Kunststoffen, Verbindungstechnologien und Leichtbaukonstruktionen durchgeführt. Unterstützung wurde auch vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im Rahmen des Projektes AMSurf (BYCZ01-032, INTERREG Bayern – Tschechien) erhalten.



Kofinanziert von  
der Europäischen Union  
Spolufinancováno  
Evropskou unií



## KONTAKT



**Dr. Martin Matušů**

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

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



**Bastian Roidl, M.Eng.**

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

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



**Prof. Dr. Jakob Rosenthal**

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

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



**Dr. Jan Papuga**

Czech Technical University  
in Prague (CTU)  
Faculty of Mechanical Engineering  
Technická 4  
CZ – 160 00 Prague 6, Dejvice

[jan.papuga@fs.cvut.cz](mailto:jan.papuga@fs.cvut.cz)



**Dr. Petr David**

Czech Technical University  
in Prague (CTU)  
Faculty of Mechanical Engineering  
Technická 4  
CZ – 160 00 Prague 6, Dejvice

[petr.david@cvut.cz](mailto:petr.david@cvut.cz)

# Einsatz von Künstlicher Intelligenz zur Optimierung der Rezeptierung und der Produktionsparameter von duroplastischen Quarzkompositen

## Zusammenfassung

Die Herstellung von duroplastischen Quarzkompositen basiert auf der Kombination von ungesättigtem Polyesterharz mit Quarzsanden, Zuschlagstoffen, Pigmenten, Härtern und Hilfsadditiven. Der Formulierungsprozess führt zu einer Suspension mit thixotropen und ausreichend fließfähigen Eigenschaften, die in kontinuierlichen Gießanlagen oder Rührbehältern verarbeitet wird. Durch mechanische Vibration beim Füllen und exotherme Härtung in der Form entsteht eine dichte, vernetzte Duroplastmatrix. Anschließendes Post-Curing sorgt für vollständige Vernetzung und geringe Porosität. Herausforderungen sind die gleichmäßige Dispergierung der Füllstoffe, die Wärmeentwicklung während der Polymerisation sowie strukturelle Defekte im Produkt. Diese Arbeit untersucht systematisch die Einflüsse von Rezeptur und Prozessparametern auf Reaktionskinetik, Rheologie und Kratzfestigkeit und nutzt KI-Modelle sowie einen digitalen Zwilling für Vorhersagen und Optimierungen im Produktionsmaßstab.

## Abstract

The manufacture of thermoset quartz composites is based on combining unsaturated polyester resin with quartz sands, fillers, hardeners, and auxiliary additives. The formulation results in a suspension which is thixotropic yet sufficiently flowable, processed either in continuous casting systems or stirred vessels. Mechanical vibration during mold filling and exothermic curing in the mold lead to a dense, crosslinked thermoset matrix, followed by post-curing to complete network formation and reduce porosity. Key challenges include achieving homogeneous filler dispersion, controlling heat release during polymerization, and minimizing structural defects to ensure product quality. This study systematically explores the effects of formulation and processing parameters on reaction kinetics, rheology, and scratch resistance, employing AI-models and a digital twin to enable predictions and optimizations at industrial scale.

## Einleitung

Die Herstellung von Quarzkomposit-Küchenspülen ist ein etabliertes industrielles Verfahren, das auf der Kombination von ungesättigtem Polyesterharz (UPR) mit gefärbten Quarzsanden und deren Mischungen, weiteren Mineralmehlen wie Dolomit oder Calciumcarbonat, Härtern, Pigmenten und Hilfsadditiven basiert. Diese Formulierung wird typischerweise in kontinuierlichen Gießanlagen (z. B. Respecta VacuCast®) oder in Mischbehältern mit geeigneter Mischtechnik hergestellt und ergibt eine thixotrope, jedoch gut fließfähige Suspension mit sehr hohem Füllstoffgehalt, in der Regel mit über 70 % Massenanteil. Die Suspension wird anschließend in glasfaserverstärkte Formen gegossen [1].

Während des Formfüllens wird das Fließverhalten der Quarz-UPR-Suspension häufig durch mechanische Vibration unterstützt, da UPR ein scherverdünnendes (pseudoplastisches) rheologisches Verhalten zeigt [2]. Der anschließende Härtungsprozess, der exotherm in der Form abläuft, führt zur Bildung einer dichten, vernetzten Duroplastmatrix [3]. Nach der Härtung wird das Material aus der Form genommen und in einem Temperofen nachgetempert, um das restliche Styrol zu vernetzen [4]. Der Prozess ist in Abbildung 1 dargestellt:

Zentrale Herausforderungen in diesem Herstellungsprozess sind die Aufrechterhaltung einer homogenen Füllstoffdispersion, die Kontrolle der Wärmefreisetzung [4] während der Polymerisation sowie die Minimierung von

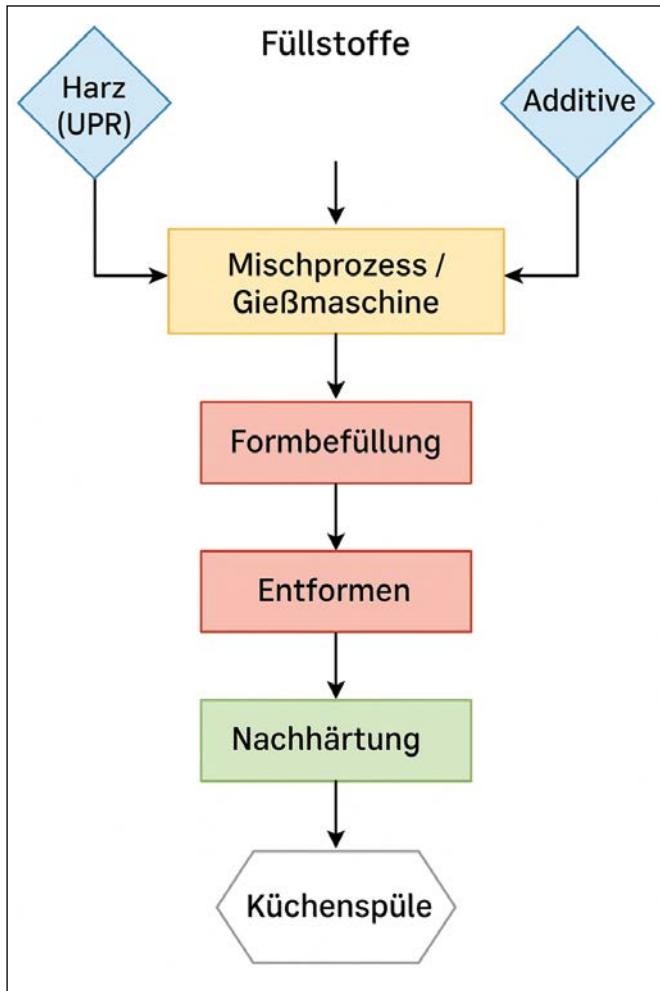


Abbildung 1: Schematischer Ablauf der Herstellung eines Quarzkomposits auf Basis eines quarzischen Füllstoffes und ungesättigtem Polyesterharz (UPR)

Porosität im Endprodukt. Letzteres wird durch den Einsatz von Vakuum während des Prozesses, die Wahl eines geeigneten Zeitfensters für die Entformung sowie durch eine nachgeschaltete Behandlung der Duroplastmatrix, das sogenannte Post-Curing, erreicht. Diese Parameter sind sowohl von der Rezeptur als auch von den Verarbeitungsbedingungen stark abhängig und erfordern daher eine strenge und präzise Prozesskontrolle über den gesamten Produktionszyklus [5].

### Methodisches Vorgehen

Das Forschungsvorhaben folgt einem systematischen, mehrstufigen Vorgehen, um Forschungslücken zu schließen und das Potenzial von Künstlicher Intelligenz (KI) für die Entwicklung und Produktion von duroplastischen Quarzkompositen nutzbar zu machen. Derzeit werden Produktionsanlagen nicht digital überwacht und liefern Ausschussquoten von teilweise mehr als 5 %. Im Zentrum stehen dabei zunächst die detaillierte Untersuchung der Reaktionskinetik, die Analyse der rheologischen Eigenschaften während des Gießprozesses sowie die Bewertung der Kratzfestigkeit als zentrales Qualitätsmerkmal der Endprodukte.

Die umfassende Datenakquise erfasst sowohl historische als auch aktuelle Rezepturen und Produktionsparameter. Parallel dazu laufen im Labor Versuchsreihen, um Grunddaten zu erheben und den Einfluss von mineralischen Füllstoffen, Rezepturbestandteilen wie Peroxiden und der Prozessparameter auf die Aushärtung und die Reaktionskinetik systematisch zu erfassen. Die rheologische Analyse des UPR-Füllstoff-Systems bildet das Fließverhalten während des Gießens präzise ab. Ergänzende, standardisierte Prüfverfahren bewerten die Kratzfestigkeit unter unterschiedlichen Prozessbedingungen [6].

Die aufbereiteten Daten werden normalisiert und für KI-Modelle nutzbar gemacht. Hierbei kommen Methoden des maschinellen Lernens, wie Neuronale Netze oder Random-Forest-Modelle, zum Einsatz, die auf Basis der Labor- und Produktionsdaten Zusammenhänge zwischen Rezeptur, Prozessparametern und Werkstoffeigenschaften erkennen und vorhersagen sollen [7]. Durch iterative Feedbackschleifen sollen die Modelle kontinuierlich verbessert werden, indem Vorhersagen im Labormaßstab experimentell überprüft und die Ergebnisse in die Modelle zurückgespeist werden.

Ein digitaler Zwilling soll den gesamten Produktionsprozess virtuell abbilden. Auf dieser Grundlage sollen später Rezepturen und Prozessparameter simuliert, Wechselwirkungen zwischen Füllstoffgehalt, Reaktionskinetik, rheologischem Verhalten und Kratzfestigkeit analysiert und Optimierungen getestet werden. Anschließend folgen Pilotversuche bei einem Industriepartner.

In der Phase der Integration und Optimierung werden die entwickelten KI-Modelle in die reale Produktion übertragen. Mithilfe digitaler Sensorik und Echtzeitüberwachung wird der Prozess fortlaufend analysiert und auf Grundlage der KI-Empfehlungen angepasst. Durch diese enge Verzahnung von Simulation, experimenteller Validierung und praktischer Anwendung sollen sich Effizienz, Ressourcen, Prozessparameter und Rezepturen nachhaltig verbessern [8].

### Vorhersage der Reaktionskinetik

Die Untersuchung der Reaktionskinetik von ungesättigten Polyesterharzen in Kombination mit mineralischen Füllstoffen liefert wesentliche Erkenntnisse für die Optimierung der Prozessführung in der Herstellung von Quarzkompositen. Ein zentraler Parameter ist dabei die sogenannte Peakzeit (Abbildung 2), also der Zeitpunkt, an dem die höchste Reaktionstemperatur während der exothermen Aushärtung erreicht wird. Die präzise Vorhersage dieser Peakzeit ist von entscheidender Bedeutung, um den besten Zeitpunkt für die Entformung festzulegen und sowohl Prozesssicherheit (Risse im Gießstück) als auch Produktqualität (Kratzfestigkeit) sicherzustellen [4, 9].

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass verschiedene Prozessparameter – insbesondere die Peroxidmenge sowie die Temperaturen von Harz, Form und Füllstoffen – signifikanten Einfluss auf die Reaktionskinetik ausüben [5, 10]. Zwischen Peroxidgehalt und Peakzeit besteht eine negative Korrelation (Tabelle 1). Mit steigendem Peroxidanteil verkürzt sich die Zeit bis zum Erreichen des Reaktionsmaximums deutlich (Abbildung 3). Gleichzeitig wurde die positive Korrelation in Abbildung 4 zwischen Gelzeit und Peakzeit ( $R^2: 0,64$ ) ermittelt, was auf die enge Kopplung dieser beiden kinetischen Größen hinweist. Darüber zeigen Temperaturvariationen in Füllstoff, Harz und Form moderate, aber dennoch reproduzierbare Einflüsse auf die Aushärtekinetik.

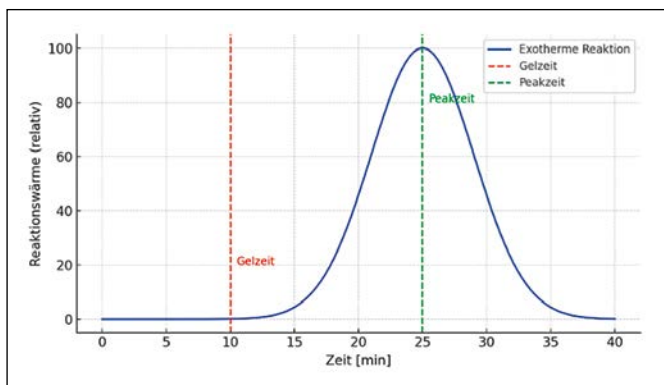


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Gelzeit und der Peakzeit ungesättigter Polyesterharze

Tabelle 1: Zusammensetzung von ungesättigtem Polyesterharz bei verschiedenen Versuchsbedingungen. Die Peroxidkonzentration ist auf die Harzmenge bezogen.

Modell	Harzanteil (%)	Temperatur (°C)	Peroxidanteil (%)	Füllstoffanteil (%)
Harz	100	15 – 35	0,8 – 3,0	0
Harz mit Füllstoff	32 – 26	15 – 35	0,8 – 3,0	74 – 68

Auf Grundlage dieser Daten wurde ein Ansatz zur Modellierung der Peakzeit mittels Künstlicher Intelligenz entwickelt. Hierfür kamen Algorithmen des maschinellen Lernens zum Einsatz, darunter Random Forests (RF) und Neuronale Netze (ANN). Die beiden Algorithmen wurden ausgewählt, da sie sich durch eine universelle Einsetzbarkeit auszeichnen und insbesondere für die Analyse komplexer Systeme mit multiplen Einflussfaktoren und nichtlinearen Abhängigkeiten geeignet sind [7, 11].

Die Ergebnisse in Tabelle 2 zeigen, dass die Modelle eine hohe Vorhersagegüte erreichen. Beide Ansätze sind somit in der Lage, die Peakzeit auf Basis der Harzdaten zuverlässig zu prognostizieren. Während Random Forest im Training leicht bessere Resultate liefert, weist das Neuronale Netz eine höhere Robustheit auf, bricht aber bei Füllstoff plus Harz vollständig ein, was sich in einem negativen  $R^2$ -Wert widerspiegelt und auf Overfitting sowie

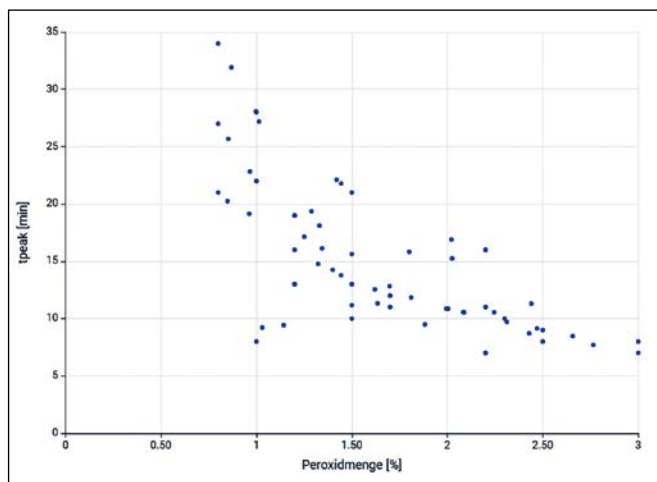


Abbildung 3: Einfluss der Peroxidmenge auf die Peakzeit bei 25°C (Stichprobe  $N = 106$ )

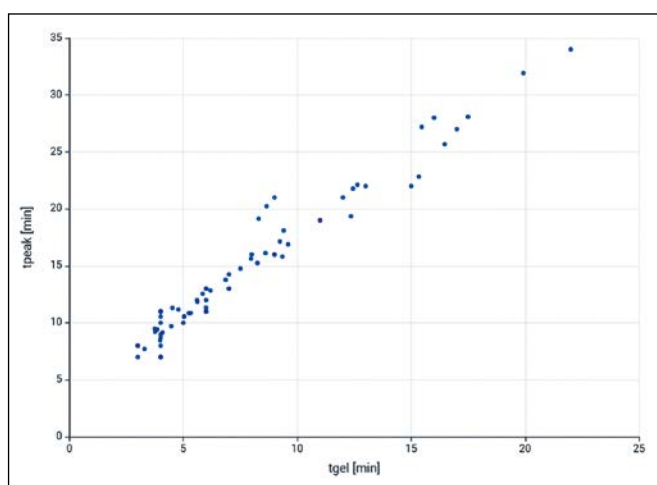


Abbildung 4: Abhängigkeit der Gelzeit und der Peakzeit (Stichprobe  $N = 106$ )

eine unzureichende Datenbasis hindeutet. Das RF-Modell für Füllstoff und Harz liefert zwar keine negativen Vorhersagewerte, korreliert mit  $R^2$  von 0,65 aber schwächer und zeigt vergleichsweise hohe Fehlerwerte.

Tabelle 2: Vorhersage der Peakzeit von reinem und gefülltem Harz unter verschiedenen Versuchsbedingungen. Das Modell umfasst 80 % Trainingsdaten und 20 % Testdaten.

Modell	Regression $R^2$		Mittlere quadratische Abweichung $\chi^2$	
	Training	Test	Training	Test
Harz: ANN RF	0,990	+0,996	2,58	14,0
	0,997	+0,986	0,631	5,86
Füllstoff und Harz: ANN RF	0,995	-0,994	11,2	-
	0,653	+0,654	67,1	-

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorhersage der Reaktionskinetik und insbesondere der Peakzeit nicht nur durch empirische Daten, sondern auch durch den Einsatz

von KI-gestützten Verfahren möglich ist. Voraussetzung ist jedoch die Erweiterung der Datenbasis auf vermutlich mindestens 200 zusätzliche Datensätze, um die Modelle mit hinreichender Robustheit und Generalisierbarkeit trainieren zu können.

### Untersuchung der Kratzfestigkeit

Die Kratzfestigkeit stellt ein zentrales Qualitätsmerkmal von Quarzkompositen dar, da sie sowohl die optische Wahrnehmung als auch die Lebensdauer der Produkte maßgeblich beeinflusst. Durch Kratzspuren beschädigte Produkte sind ein Hauptgrund für den Ausschuss während der Produktion. Besonders bei dunklen Oberflächen werden kleinste Beschädigungen durch Lichtbrechung und Mikrorisse deutlich sichtbar (Abbildung 5). Ziel der Untersuchung ist es daher, die Einflussfaktoren auf die Kratzfestigkeit systematisch zu identifizieren und Ansatzpunkte für eine gezielte Optimierung der Rezeptur zu entwickeln [12, 13].



Abbildung 5: Kratzspuren verschiedener Stärken auf der Oberfläche eines Quarzkomposits

Für die Versuchsreihen wurde ein orthophthalsäurebasiertes Polyesterharz in Kombination mit einem schwarzen Füllstoff (Granucol-Mix® 10/2025) eingesetzt. Die Aushärtung erfolgt durch Zugabe von Methylethylketonperoxid (Peroxan ME-50-LX) unter Variation des Anteils zwischen 5 und 31 g/kg. Die Versuchsbedingungen umfassen unterschiedliche Harz-, Füllstoff- und Formtemperaturen, Post-Curing-Temperaturen und -zeiten sowie abweichende Harzanteile. Die Kratzprüfung erfolgte nach DIN EN 13310 [6] mittels Erichsen-Scratch-Tester bei einer Kraft von 2 N und anschließender mikroskopischer Analyse. Hierbei wurde die Kratzbreite und die Kratztiefe in  $\mu\text{m}$  gemessen.

Die Auswertung zeigt, dass mehrere Prozessparameter mit der Kratzfestigkeit mehr oder minder signifikant korrelieren:

- Ein höherer *Harzanteil* verbessert die Kratzfestigkeit, was auf höhere Matrixintegrität und homogenere Einbettung der Füllstoffe zurückzuführen ist.
- Der *Peroxidanteil* erwies sich bei einer Kraft von 2 N als nicht signifikant.
- Sowohl Temperatur als auch Dauer des *Post-Curing* haben einen positiven Einfluss. Bei 100 °C sind mehr als 4 Stunden günstig. Längere Nachbehandlung verbessert die Kratzfestigkeit, vermutlich durch die vollständige Vernetzung des Harzsystems.
- *Raum-, Füllstoff- und Formtemperaturen* ließen einen schwachen Trend erkennen: Hohe Füllstoff- und Raumtemperaturen sowie moderate Formtemperaturen von 25 °C steigern tendenziell die Kratzfestigkeit.

Die Kratzspuren nach DIN EN 13310 mittels Erichsen-Scratch-Tester bei verschiedenen Kräften (0,5 bis 10 N) wurden mithilfe eines Keyence-Mikroskops VK-X3000 hinsichtlich ihrer Topographie, Kratzbreite und Kratztiefe untersucht (Abbildung 6). Die beobachteten Oberflächenveränderungen lassen sich in vier Kategorien einteilen:

Bei geringen Kräften tritt keine sichtbare Modifikation der Oberfläche auf; die Prüfnadel gleitet lediglich über die Oberfläche, ohne diese dauerhaft zu beeinflussen (Abbildung 7, Kategorie 1). Bei höheren Kräften gleitet die Nadel über die Oberfläche und verursacht leichte Veränderungen durch Glätten oder ein flaches Eindringen der Materialoberfläche (Kat. 2). Bei weiter steigendem Kraftaufwand dringt die Nadel in die Oberfläche ein und führt durch Materialverdrängung zu Aufwölbungen (*Pile-ups*, Kat. 3). Überschreiten die auf die Nadel wirkenden Kräfte eine kritische Schwelle, so dringt der Nadelkopf vollständig in die Oberfläche ein, was zur Ausbildung stark rissiger und ausgerissener Kratzspuren führt (Kat. 4).

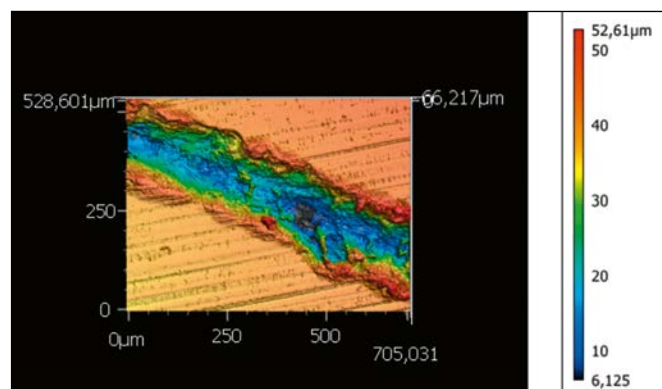


Abbildung 6: Darstellung eines Kratzers unter dem Lasermikroskop

Die Kratzspuren wurden gemäß dem in Abbildung 8 dargestellten Schema hinsichtlich ihrer Kratzbreite (rot) und Kratztiefe (orange) vermessen. Die Auswertung der Messdaten zeigt einen nichtlinearen, polynomialen

Zusammenhang zwischen Breite und Tiefe (Abbildung 9). Dabei nimmt die Kratztiefe mit zunehmender Prüfkraft und wachsender Kratzbreite zu.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kratzfestigkeit von Quarzkompositen zwar durch verschiedene Prozessparameter beeinflusst wird, die Effekte jedoch insgesamt moderat ausfallen. Ein klarer nichtlinear-polynomialer Zusammenhang zwischen Kratzbreite und Kratztiefe konnte identifiziert werden.

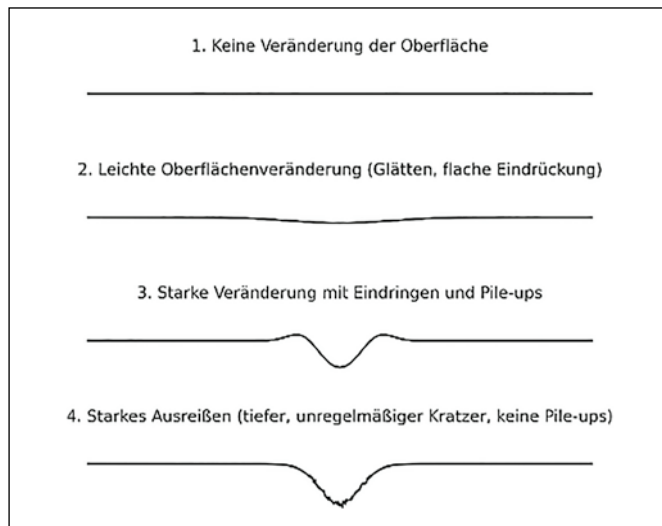


Abbildung 7: Querschnittsfläche von Kratzspuren verschiedener Kategorie: mit typischer Ausbildung der Kratzstrukturen

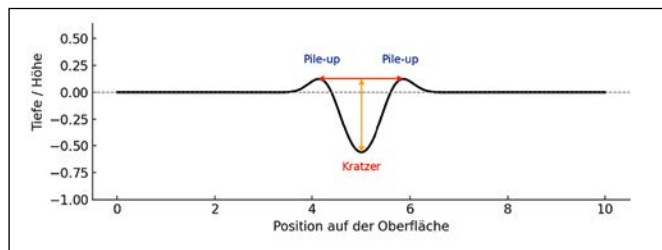


Abbildung 8: Profil eines Kratzers schematisch abgebildet mit der Breite (rot) und der Tiefe (orange)

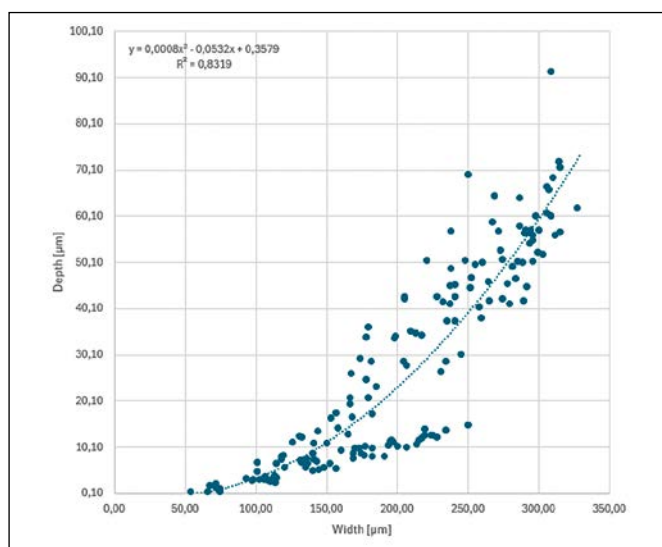


Abbildung 9: Abbildung des Verhältnisses von Eindringtiefe und Kratzbreite

## Aufbau eines digitalen Zwillings

Der Aufbau eines digitalen Zwillings für die Herstellung von Quarzkompositen verfolgt das Ziel, den realen Produktionsprozess virtuell abzubilden und ein datenbasiertes Werkzeug für die Prozessanalyse und -optimierung bereitzustellen [14]. Grundlage hierfür ist die systematische Erfassung von Prozess- und Umgebungsdaten in Echtzeit. Diese Daten umfassen die Temperaturen von Harz, Füllstoff und Formen, die zeitliche Entwicklung der Aushärtungsreaktion sowie Umgebungsparameter wie Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit.

An der Produktionslinie erfassen digitale Sensoren (Thermokameras) kontinuierlich Messwerte. Ein zentrales Datensystem dient als Schnittstelle zwischen realem Prozess und virtueller Modellierung. Das virtuelle Abbild der Anlage stellt den aktuellen Zustand dar und simuliert zukünftige Prozessentwicklungen. Der digitale Zwilling bildet somit die Grundlage für den Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens (ML) und Künstlicher Intelligenz (KI), um Prozessverbesserungen in Echtzeit vorzuschlagen und Rückschlüsse auf Rezeptur- und Prozessparameter zu ziehen [8].

Im September 2025 wurden bei einem Industriepartner in Polen die ersten Sensoren erfolgreich installiert. Die kontinuierlich generierten Prozessdaten schaffen die Grundlage für die Validierung der Laborergebnisse, die Kalibrierung des digitalen Zwillings sowie das Training der KI-Modelle.

Die thermischen Vorgänge während des Formgebungs- und Aushärtungsprozesses werden mithilfe einer Infrarotkamera analysiert. Die dargestellten Bilder und Messwerte zeigen einen Ausschnitt, um die Methodik zu veranschaulichen. Abbildung 10 zeigt die Temperaturverteilung der leeren Form unmittelbar vor der Befüllung, wobei sowohl die Innen- als auch die Außenflächen berücksichtigt wurden. Die leicht ansteigende Entwicklung der Matrixtemperatur im Tagesverlauf ist in den Abbildungen 11 und 12 dargestellt. Während der exothermen Reaktion in der Form steigt nach 20 Minuten die Außentemperatur auf den höchsten Wert von 50 °C an der exponierten Stelle. Andere Bereiche erreichen über 40 °C. Beim Öffnen der Form werden Temperaturunterschiede innerhalb des Materials sichtbar, die zwischen 62 °C und 71 °C variieren (Abbildung 13 und 14).

Langfristig ermöglicht die Integration dieser Daten im digitalen Zwilling die Vorhersage und Optimierung zentraler Material- und Prozessparameter und soll wesentlich zur Erhöhung der Prozessstabilität, Gleichmäßigkeit, Ressourceneffizienz und Produktqualität beitragen.

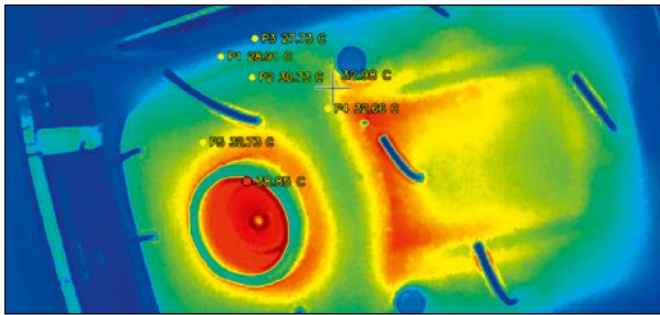


Abbildung 10: Geschlossene Gussform vor der Befüllung mit Gießmasse im Wärmebild: Aufnahme der Formtemperatur

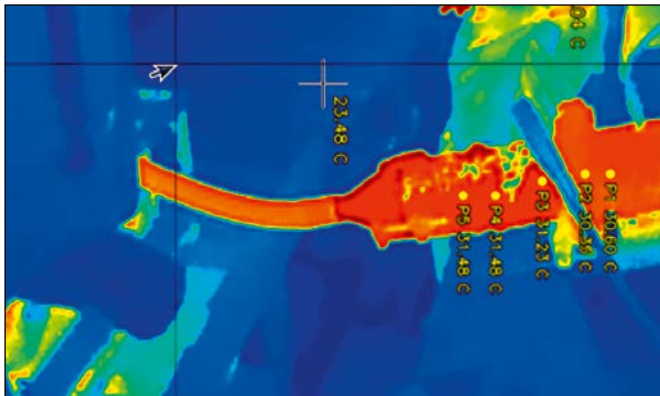


Abbildung 11: Aufnahme der Temperaturen der Gießmatrix der Mischanlage

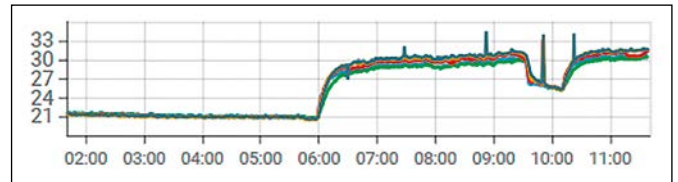


Abbildung 12: Temperaturprofil der Matrix ab Schichtbeginn

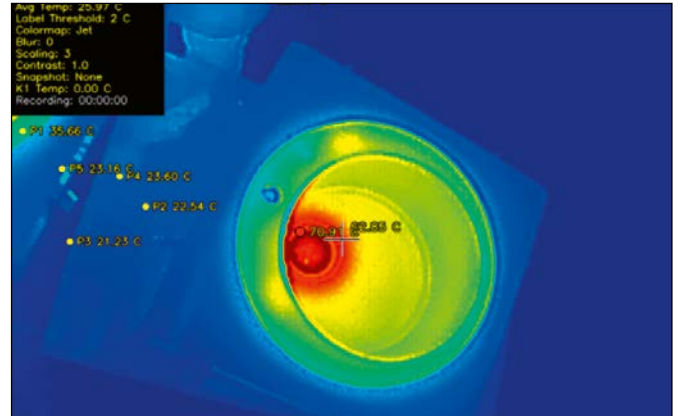


Abbildung 13: Geöffnete Form und Temperaturprofil nach Aushärtung und kurz vor Entnahme des Bauteils

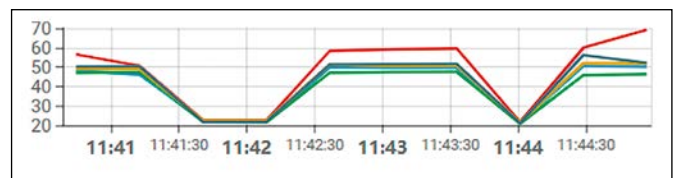


Abbildung 14: Temperaturprofil der geöffneten Formen bzw. der Produktoberflächen

## Ausblick

Mit der Analyse der reaktionskinetischen Peakzeit konnte ein entscheidender Prozessparameter für die sichere Entformung und Qualitätskontrolle herausgearbeitet werden. KI-gestützte Modelle zeigen, dass Vorhersagen der Peakzeit in Abhängigkeit von Peroxidanteil, Gelzeit und Temperaturprofilen grundsätzlich möglich sind, wenngleich eine weitere Datenbasis notwendig bleibt, um die Prognosegüte signifikant zu erhöhen. Auf Basis der kontinuierlichen Prozessdatenerfassung wird ein digitaler Zwilling den Herstellungsprozess virtuell abbilden, Prozessparameter simulieren und KI-gestützte Opti-

mierungen durchführen. Vertiefende Untersuchungen zur Kratzhärte und Rheologie werden künftige Anpassungen der Rezeptur- und Prozessparameter begleiten.

Durch die enge Verzahnung von Laboranalysen, KI-gestützter Modellierung und industrieller Validierung leistet das Forschungsvorhaben schlussendlich maßgebliche Beiträge zur Effizienzsteigerung, Qualitätsverbesserung und Ressourcenschonung in der Produktion von duroplastischen Quarzkompositen.

## Referenzen:

- [1] Hock, K., Paternoster, R., Reichenberger, R., Kunststoffformkörper und Verfahren zu dessen Herstellung, Offenlegungsschrift DE10200405365A1 (2004).
- [2] Bierwirth, S. P., Lineare und nichtlineare rheologische Untersuchungen von Relaxationsprozessen in glasbildenden Flüssigkeiten, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2019.
- [3] Schock, F., Bauteil, insbesondere Einbauspüle sowie Verfahren zu seiner Herstellung, Europäisches Patent EP361101B2 (1989).

- [4] Rojas, A., Borrajo, J., Williams, R., The Curing of Unsaturated Polyester Resins in Adiabatic Reactors and Heated Molds, *Polymer Engineering and Science* 21 (1981).
- [5] Waigaonkar, S., Babu, B., Rajput, A., Curing studies unsaturated polyester resin used in FRP products, *Indian J. Engineering & Material Sciences* 18 (2011) 31-39.
- [6] DIN EN 13310:2015+A1:2018, Küchenspülen – Funktionsanforderungen und Prüfverfahren, Berlin: 2019.
- [7] Romagnoli, J. A., Briceño-Mena, L., Manee, V., AI in Chemical Engineering: Unlocking the Power Within Data. CRC Press, 2024, pp. 95-103.
- [8] Andraju, N., Curtzwiler, G., Kozliak, E., Ranganathan, P., Machine Learning based Predictions of Polymer and Postconsumer Recycling Polymer Properties: A comprehensive Review, *ACS Applied Materials and Interfaces* (2022).
- [9] Sobhani et al., A hybrid predictive modeling approach for catalyzed polymerization reactors. *Chemical Engineering Journal Advances* 20 (2024) 100662.
- [10] Matušková et al., Effect of Accelerators on the Curing of Unsaturated Polyester Resins: Kinetic Model for Room Temperature Curing, *Ind. Eng. Chem. Res.* 60 (2021) 14143–14153.
- [11] Papp, S., Weidinger, W., Munro, K., Ortner, B., Cadonna, A., Langs, G., Licandro, R., Meir-Huber, M., Nikolić, D., Toth, Z., Vesela, B., Wazir, R., Zauner, G., *The Handbook of Data Science and AI: Generate Value from Data with Machine Learning and Data Analytics*, 2. Aufl., München: Hanser, 2024.
- [12] Friedrich, K., Schlarb, A. K., *Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*, 2. Aufl., Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [13] Barr, C.J., Wang, L., Coffey, J.K., & Daver, F., Influence of Surface Texturing on Scratch/Mar Visibility for Polymeric Materials: A Review, *J. Materials Science* 52 (2017) 1221-1234.
- [14] Braun, M., Pokorni, B., Knecht, C., *Maschinenzentrierte KI-Anwendungen in der Produktion*. Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO (2021).

**Projektpartner:**

Gebrüder Dorfner GmbH & Co. KG, 92242 Hirschau

**KONTAKT**



**Marco Süß, M.Eng.**

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

m.suess3@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

## Hygiene und Medizintechnik – Analyse von Materialveränderungen bei der Aufbereitung chirurgischer Instrumente mit einem neuartigen Biozid

### Zusammenfassung

Nosokomiale Infektionen bleiben eine große Herausforderung im Gesundheitswesen, da sie häufig zu längeren Krankenhausaufenthalten und höheren Kosten führen. Um dieses Risiko zu verringern, hat das Hygieneunternehmen Azett eine innovative Biozidformulierung entwickelt, die die Sicherheit der Patienten bei chirurgischen Eingriffen verbessern soll. In Zusammenarbeit mit dem Medizintechnikunternehmen ulrich medical wurde die Verträglichkeit dieses Desinfektionsmittels bezüglich verschiedener chirurgischer Instrumente untersucht. ulrich medical stellte dafür eine Auswahl an Rohstoffen und Instrumenten bereit, um eine umfassende Prüfung der Materialverträglichkeit durchzuführen. Ziel der Studie war es, mögliche Beeinträchtigungen der Funktion durch Materialveränderungen zu erkennen, insbesondere bei Materialien, die zu Korrosion oder Farbveränderungen neigen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Biozidformulierung keinen schädigenden Einfluss auf die meisten chirurgischen Instrumente hat, jedoch bei einigen Materialien Anzeichen von Korrosion und Veränderungen auftreten. Diese Erkenntnisse heben die Bedeutung einer weiteren Optimierung und Verträglichkeitsprüfung von Desinfektionsmitteln hervor, um die Wirksamkeit und Sicherheit bei allen in der Klinik und Chirurgie verwendeten Materialien sicherzustellen. Eine Prüfung bereits während der Entwicklung erscheint sinnvoll, um die Kompatibilität von Desinfektionsmitteln mit Materialien sicherzustellen, und damit die spätere Anwendung und Wiederaufbereitung zu erleichtern und zu verbessern.

### Abstract

Nosocomial infections remain a major challenge in healthcare, as they often lead to longer hospital stays and higher costs. To reduce this risk, hygiene company Azett has developed an innovative biocide formulation designed to improve patient safety during surgical procedures. In collaboration with the medical technology company ulrich medical, the compatibility of this disinfectant with various surgical instruments was investigated. ulrich medical provided a selection of raw materials and instruments for this purpose in order to carry out a comprehensive test of material compatibility. The aim of the study was to identify possible impairments to function due to material changes, particularly in materials that are prone to corrosion or color changes. The results show that the biocide formulation has no harmful effect on most surgical instruments, but signs of corrosion and changes occur in some materials. These findings highlight the importance of further optimization and compatibility testing of disinfectants to ensure efficacy and safety for all materials used in clinical and surgical settings. Testing during the development stage appears to be a sensible measure to ensure the compatibility of disinfectants with materials, thereby facilitating and improving subsequent application and reprocessing.

---

### 1 Einleitung

Krankenhausinfektionen stellen nach wie vor ein großes Problem für die Gesundheit der Patienten in klinischen

Einrichtungen dar. Sie können zu längeren Aufenthalten im Krankenhaus, höheren Kosten und sogar lebensbedrohlichen Komplikationen führen [1]. In Deutschland erkranken jährlich zwischen 400.000 und 600.000

Patienten an solchen Infektionen, was zu etwa 10.000 bis 15.000 Todesfällen führt. Es wird geschätzt, dass durch verbesserte Hygienemaßnahmen 20 bis 30 Prozent dieser Infektionen verhindert werden könnten, was jährlich bis zu 4.500 Menschenleben retten könnte [2]. Die Infektionsprävention ist daher ein wichtiger Faktor, um die Versorgung der Patienten zu verbessern und die Kosten im Gesundheitswesen zu senken.

Studien zeigen, dass die meisten Mikroorganismen, welche postoperative Wundinfektionen verursachen, bereits während der Operation in die Wunde gelangen. Da sich chirurgische Wunden meist innerhalb von 24 bis 48 Stunden nach der Operation ausreichend schließen, scheinen dann weniger externe Infektionen aufzutreten [3, 4]. Um das Infektionsrisiko während der Operation zu verringern und die Sicherheit der Patienten zu erhöhen, hat die Azett GmbH (Azett GmbH & Co. KG, Ungerhausen) eine neue Biozidformulierung für Medizinprodukte im OP entwickelt. Dieses Produkt ist in der EU patentiert und hat bereits die standardisierte Wirksamkeitsprüfung nach EN 13727 bestanden.

In Zusammenarbeit mit ulrich medical (ulrich GmbH & Co. KG, Ulm), einem Hersteller für chirurgische Instrumente, wurde die Verträglichkeit dieses neuartigen Desinfektionsmittels mit realen OP-Instrumenten überprüft. Besonders wurde darauf geachtet, ob das Mittel die Instrumente beeinträchtigt, zum Beispiel durch Materialveränderungen wie Korrosion, oder, vor allem bei empfindlichen Werkstoffen, Farbveränderungen am Material hervorruft.

## 2 Material und Methode

In der Studie wurden ausschließlich Prüfmuster verwendet, die von ulrich medical bereitgestellt wurden. Diese bestanden aus Materialproben und medizinischen Instrumenten aus unterschiedlichen Werkstoffen, u. a. fünf verschiedene Stähle und Farbmarkierungen (Farbringe). Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass die Proben typische Materialien aus dem klinischen Alltag enthalten (z. B.: Instrumente aus Stahl, Kunststoff und Silikon), um eine realistische Bewertung zu ermöglichen.

Für die Tests wurden 35 chirurgische Instrumente aus den Wirbelsäulensystemen von ulrich medical ausgewählt. Diese Instrumente deckten fünf verschiedene Arten ab, was eine breite Perspektive auf die Verträglichkeit der Biozidlösung bietet. Die Instrumente, unterteilt in Greif-, Schneid-, Klemm-, Halte-, Palpations- und Messinstrumente, wurden wie folgt unterteilt:

- Hülsen für Bohrer
- Phantomstangen
- langstielige Schneidezangen
- Ablenkungszangen
- Tiefenmessgeräte



Abbildung 1: ausgewählte chirurgische Instrumente

Es wurden drei verschiedene Methoden ausgewählt, um die realitätsnahe Nutzung eines Desinfektionsmittels zu simulieren. Diese Methoden wurden unterteilt in: Einweichen, Waschen (zur Prüfung der Abriebfestigkeit) und eine beschleunigte Alterung mittels Klimakammer. Die Prüfkörper wurden entweder mit dem Desinfektionsmittel abgewischt oder darin eingetaucht. Nach bestimmten Zeitintervallen wurden sie sowohl makroskopisch (mit bloßem Auge) als auch mikroskopisch untersucht. Dabei wurde zusätzlich die Oberflächenrauigkeit gemessen und elektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Die Experimente fanden in den Laboren der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (Standort Weiden) statt.

Die Herstellervorgabe für Aufbereitung der chirurgischen Instrumente und Implantate beinhaltet die Desinfektion der Produkte durch eintauchen in das Desinfektionsmittel kurz vor der Anwendung. Auf der Grundlage dieses Anwendungsszenarios wurde die erste Aufbereitungsmethode „Einlegen“ konzipiert (Abbildung 2 links), bei der die Rohstoffe maximal 2341,5 Stunden und die chirurgischen Instrumente maximal 1573,5 Stunden mit dem Desinfektionsmittel in Kontakt waren.

Außerdem wurde die Abriebfestigkeit von Rohmaterialien, Farbringen und Stählen untersucht. Dafür wurde eine simulierte Wischdesinfektion durchgeführt, bei der das Elcometer 1720 Prüfgerät (siehe Abbildung 2 Mitte; Elcometer Instruments GmbH; Aalen) verwendet wurde. Dabei wurden Schwämme mit synthetischem Vliesmaterial umwickelt und ständig mit Desinfektionsmittel getränkt. Diese wurden mit einer festgelegten Zyklenzahl über die Proben gewischt, um die Verträglichkeit der Materialien zu untersuchen.

Für die Alterungstests in der Klimakammer wurden alle Prüfkörper in einem luftdichten Behälter (siehe Abbildung 2 rechts) mit der Desinfektionslösung für drei Wochen bei 55 °C gelagert. Diese Bedingungen simulieren eine Alterungsdauer von etwa sechs Monaten in der Realität. Der beschleunigte Alterungstest wurde nach den Vorgaben der Prüfnorm ASTM F1980-07 durchgeführt.



Abbildung 2: Versuchsaufbau der drei Methoden (Eintauch- und Abriebprüfung)

Nach jeder Behandlung wurden die Prüfmuster analysiert, um Abnutzung, Verschleiß oder Schäden wie Korrosion oder Farbveränderungen festzustellen. Die chirurgischen Instrumente wurden außerdem einer detaillierten Funktionsprüfung unterzogen, um sicherzustellen, dass sie weiterhin einwandfrei funktionieren und ihre mechanischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt sind.

Bei den Farbbringproben wurde eine gründliche Bewertung der Farbqualität durchgeführt, wobei besonderes Augenmerk auf die Farbstabilität und -intensität gelegt wurde. Nach jeder Behandlung wurden die Proben sowohl mit bloßem Auge als auch mit dem Lasermikroskop KEYENCE VK-X100 (KEYENCE DEUTSCHLAND GmbH, Frankfurt am Main) untersucht. Bereits durch Literaturrecherchen und Vorversuche bekannte Schwachstellen wurden gezielt ausgewählt, um die Reaktion auf das Desinfektionsmittel auf mikroskopischer Ebene genauer bewerten zu können. Diese Schwachstellen wurden fotografiert und die Bilder anschließend unter dem Mikroskop verglichen.

Außerdem wurde die Oberflächenrauheit der Prüfkörper mittels Lasermikroskop gemessen, um auch optisch nicht sichtbare Veränderungen an der Oberfläche zu detektieren. Am Ende der Tests wurden die fünf verschiedenen Rohstähle zusätzlich mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) JEOL JSM 5600LV (JEOL GmbH, Freising) analysiert. Die REM-Bilder wurden detailliert ausgewertet, um mögliche Veränderungen wie Partikelablagerungen, Rauheit oder strukturelle Anomalien in der Oberflächenstruktur zu erkennen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Stahl

Nach dem ersten Immersionstest (30 Minuten) konnten auf allen Stahlsorten nach dem Trocknen nur leicht entfernbare Flecken festgestellt werden. Da alle Proben diese Flecken aufwiesen, handelt es sich möglicherweise um Rückstände des Desinfektionsmittels. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die meisten Stahlrohstoffe durch das Desinfektionsmittel im Allgemeinen nicht beeinträchtigt wurden.

Eine Ausnahme bildete die Probe „E“, die aus Stahl des Typs X46Cr13 (1.4034) besteht und bei der es Unterschie-

de je nach Behandlungsmethode gab. Bei den Tauchversuchen zeigte diese Probe an einer markierten Stelle braune Flecken, was auf elektrochemische Reaktionen und Rostbildung zurückzuführen sein könnte. Diese Rostbildung trat an einer Stelle auf, die nur in feuchtem Kontakt mit der Desinfektionslösung war, ohne vollständig eingetaucht zu sein. Eine Woche nach dem Test wurden unter dem Mikroskop kleine braune Punkte entdeckt, die während des Kontakts mit dem Desinfektionsmittel entstanden sind (siehe Abbildung 3).

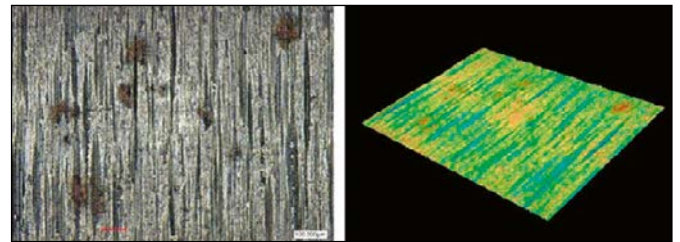


Abbildung 3: Beispiel einer REM- und Rauheitsmessung der Probe „E“

Bei der Messung der Oberflächenrauigkeit der Muster wurden ebenfalls keine signifikanten Veränderungen festgestellt, was darauf hindeutet, dass das Desinfektionsmittel die Oberflächenrauheit während des Tests nicht beeinträchtigt hat. Einzig bei der Probe „E“ wurde Lochfraßkorrosion an drei Messpunkten nach dem Abriebtest festgestellt, was die Werte Rauheitswerte beeinflusste. Die Rauheitswerte sind Kenngrößen zur Beschreibung der Oberflächenrauheit eines Werkstücks. Die Rauheitswerte  $R_v$ ,  $R_p$  und  $R_z$  geben an, wie tief die tiefste Vertiefung ( $R_v$ ), wie hoch die höchste Erhebung ( $R_p$ ) und wie groß die mittlere Rauheit ( $R_z$ ) eines Oberflächenprofils innerhalb einer definierten Messstrecke ist. Diese Veränderungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Überblick über die Ergebnisse der Rauheitsmessung nach dem Abriebtest

	before	after
<b><math>R_v</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	17,2	28,2
<b><math>R_p</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	11,2	22,9
<b><math>R_z</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	28,3	44,5

Bei den beschleunigten Alterungstests für die Probe „E“ wurde eine Veränderung durch Wasserstoffkorrosion vermutet, da die getauchte Oberfläche eine starke Reaktion zeigte, die sich durch eine schwarze Verfärbung, ähnlich dem Brünieren, auszeichnete. Mikroskopische Aufnahmen zeigten lediglich eine leichte Verdunkelung, die die Sicht auf die Oberflächenmerkmale nicht beeinträchtigte. Dies deutet darauf hin, dass die schwarze Schicht sehr dünn war.

#### 3.2 Farbbringe

Unabhängig von der angewendeten Behandlungsmethode wurden die Farben der Markierungen der Proben nach

Abschluss des Tests dunkler, matter und verloren ihren ursprünglichen Glanz. Dennoch zeigten die Farbringe weder makroskopisch noch mikroskopisch Schäden oder deutliche Entfärbungen. Außerdem ergaben die Rauheitsmessungen der Farbringe nach den Tests keine signifikanten Veränderungen der Oberflächenrauheit. Das deutet darauf hin, dass das Desinfektionsmittel die Oberfläche der Farben nicht wesentlich beeinträchtigt hat (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Farbringe vor (A) und nach (B) dem Abriebtest

### 3.3 Chirurgische Instrumente

Die chirurgischen Instrumente wurden durch das Desinfektionsmittel im Allgemeinen nicht beeinträchtigt. Allerdings zeigten das Ober- und Unterteil sowie die Federn der langstieligen Schneidezange aus Stahl der Sorte X20Cr13 (1.4021) und einige Teile der Distractionszange aus Stahl der Sorte X17CrNi16-2 (1.4057) nach dem Klimakammertest Anzeichen von Sauerstoffkorrosion, sichtbar durch kleine braune Flecken. Zudem wurde eine Verdunkelung der Messskala am Tiefenmessgerät und seiner Hülse festgestellt (siehe Abbildung 5).

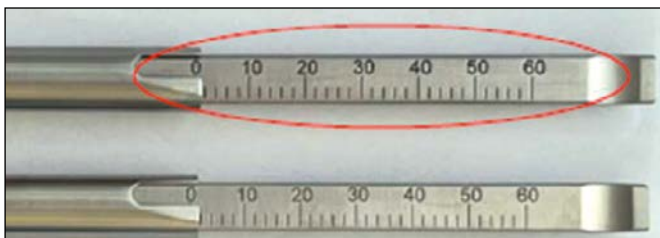


Abbildung 5: Tiefenmesser (oben: behandelte Probe, unten: unbehandelte Probe)

Was die Rauheit betrifft, so zeigten alle im „Eintauch“-Test und in der Klimakammer behandelten Instrumententypen keine signifikanten Veränderungen. Die einzige Ausnahme bildet dabei das Tiefenmessgerät. Hier war die Veränderung der Profilhöhe deutlich sichtbar: Der Rz-Wert sank von 84  $\mu\text{m}$  auf 42  $\mu\text{m}$ .

## 4 Fazit

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die neuartige Biozidformulierung der Azett GmbH & Co. KG im Allgemeinen eine gute Verträglichkeit mit den meisten chirurgischen Instrumenten und Rohmaterialien aufweist. Bestimmte Materialien, insbesondere solche mit höherem Kohlenstoffgehalt, zeigten jedoch eine erhöhte Korrosionsanfälligkeit, wenn sie dem Desinfektionsmittel ausgesetzt wurden. Dies zeigte sich in der Bildung von braunen Flecken und Rost auf einigen wenigen Stahlproben, wie z. B. dem Stahltyp X46Cr13 (1.4034), während der Immersionstests.

Bei den beschleunigten Alterungstests wurde auf den in das Desinfektionsmittel getauchten Oberflächen Wasserstoffkorrosion festgestellt, die durch eine schwarze, brünerungsähnliche Verfärbung gekennzeichnet war. Obwohl die Verfärbung dünn war und die Oberflächenmerkmale nicht verdeckte, deutet dies darauf hin, dass das Desinfektionsmittel im Laufe der Zeit zu subtilen Veränderungen der Materialeigenschaften führen kann.

Die farbigen Ringe zeigten keine signifikanten Veränderungen der Oberflächenstruktur oder -rauheit, obwohl sie nach den Tests dunkler und matter erschienen. Dies deutet darauf hin, dass das Desinfektionsmittel diese Oberflächeneigenschaften nicht wesentlich beeinflusst hat.

Die chirurgischen Instrumente zeigten bis auf wenige Ausnahmen keine Materialveränderung durch das Desinfektionsmittel. An Teilen der langstieligen Schneidezange und der Distractionszange wurde nach dem Klimakammertest Sauerstoffkorrosion festgestellt. Außerdem wiesen die Tiefenmessgeräte Veränderungen der Oberflächenrauheit und der Profilhöhe auf, was darauf hindeutet, dass eine längere Einwirkung des Desinfektionsmittels in der Klimakammer in Kombination mit dem Desinfektionsmittel die Materialeigenschaften verändern könnte.

Die Ergebnisse zeigen, dass die materialverändernde Wirkung des Desinfektionsmittels vom zugrunde liegenden Material abhängt. Daher sollte die Wechselwirkung zwischen dem Material und dem Wirkstoff bereits bei der Entwicklung von Medizinprodukten berücksichtigt werden. Zukünftige Untersuchungen sollten sich auf Verträglichkeitstests mit Stählen unterschiedlicher Zusammensetzung konzentrieren, wobei dem Kohlenstoffgehalt als kritischem Parameter besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Das Verständnis der Wechselwirkung zwischen dem Desinfektionsmittel und den verschiedenen Materialien wird für die Optimierung seiner Formulierung und die Gewährleistung seiner Wirksamkeit und Sicherheit bei chirurgischen Anwendungen von wesentlicher Bedeutung sein.

## Referenzen:

- [1] Eyal Zimlichman, Daniel Henderson, Orly Tamir, Calvin Franz, Peter Song, Cyrus K. Yamin, Carol Keohane, Charles R. Denham, David W. Bates. Health Care – Associated Infections: A Meta-analysis of Costs and Financial Impact on the US Health Care System. JAMA Internal Medicine, 2013.
- [2] Gastmeier P, „Nosokomiale Infektionen in Deutschland. Wieviele gibt es wirklich?“, Dtsch Med Wochenschr 2008. 133(21): p 1111-1115.
- [3] Giacometti A, Cirioni O, Schimizzi AM, Del Prete MS, Barchiesi F, D'Errico MM, Petrelli E, Scalise G. 2000. Epidemiology and Microbiology of Surgical Wound Infections. Journal of Clinical Microbiology, Volume 38, Number 2.
- [4] National Wound Care Strategy Programme: (2021), Recommendations for Surgical Wounds

## KONTAKT



**Prof. Dr. 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  
Präsident  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

c.bulitta@oth-aw.de

*Bayerns Energie  
nutzt Sonnenstunden.  
Zu jeder Tageszeit.*

Mit flexiblen Energie-Lösungen  
der Bayernwerk-Gruppe für Ihren Betrieb.



**Zukunft machen wir. Hier.**  
[bayernwerk.de/zukunft](https://bayernwerk.de/zukunft)

**bayernwerk**



# Implementierung der elektrischen Impedanztomographie in der klinischen Praxis: Potenziale und Herausforderungen

## Zusammenfassung

Die elektrische Impedanztomographie (EIT) ist ein nicht-invasives, bildgebendes Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung der Lungenfunktion bei beatmeten Patienten. Trotz ihres klinischen Potenzials ist die EIT bislang nur begrenzt in den klinischen Alltag integriert. Ziel dieser Studie ist es, die Implementierung der EIT am Beispiel der Intensivstation eines Maximalversorgers systematisch zu untersuchen. Als Grundlage dient eine Einzelfallstudie zur Einführung des Lungenfunktionsmonitors PulmoVista 500 der Firma Dräger. Im Rahmen der Fallstudie erfolgt eine Analyse der bestehenden Arbeitsabläufe, Schulungskonzepte und infrastrukturellen Voraussetzungen auf der Intensivstation. Auf dieser Basis wird ein Implementierungskonzept entwickelt. Hieraus resultiert nicht nur eine individualisierte, an die lungenphysiologischen Gegebenheiten angepasste Beatmung der Patienten, sondern führt zugleich zu einer Optimierung bestehender Arbeitsabläufe. Der Impedanztomograph wird mittlerweile routinemäßig zur Beurteilung des Beatmungszustands bei allen invasiv beatmeten Patienten eingesetzt.

## Abstract

Electrical impedance tomography (EIT) is a non-invasive imaging technique for the continuous monitoring of lung function in mechanically ventilated patients. Despite its clinical potential, EIT has so far been only partially integrated into routine clinical practice. The aim of this study is to systematically examine the implementation of EIT using the example of the intensive care unit of a maximum care provider. The study is based on a single-case analysis focusing on the introduction of the PulmoVista 500 lung function monitor by Dräger. As part of the case study, existing workflows, staff training concepts, and infrastructural conditions in the ICU are analyzed. Based on these findings, an implementation strategy is developed. This not only enables individualized ventilation tailored to the patient's pulmonary physiology but also contributes to the optimization of clinical workflows. The impedance tomograph is now routinely used to assess the ventilation status of all invasively ventilated patients.

## 1 Einleitung

Die elektrische Impedanztomographie (EIT) ist ein innovatives, nicht-invasives und strahlungsfreies Bildgebungsverfahren, das zunehmend in Diagnostik und Patientenüberwachung eingesetzt wird. Im Gegensatz zu konventionellen Verfahren wie Röntgen oder Computertomographie (CT) ermöglicht sie die Echtzeiterfassung physiologischer Prozesse ohne zusätzliche Risiken für die Patienten. Besonders in der Lungenmedizin bietet die EIT Vorteile, da sie eine kontinuierliche Überwachung der regionalen Belüftung erlaubt und somit Veränderungen

durch Lagerung, Beatmungseinstellungen oder pathologische Prozesse unmittelbar sichtbar macht [1], [2].

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde in Kooperation mit der Drägerwerk AG & Co. KGaA durchgeführt. Ziel ist die Einführung der EIT als unterstützendes Monitoring-Verfahren auf der Intensivstation eines Schwerpunktversorgers. Dazu soll der Lungenfunktionsmonitor PulmoVista 500 innerhalb eines Jahres etabliert und standardisierte Anwendungskonzepte entwickelt werden.

Langfristig soll die EIT als festes Instrument der intensivmedizinischen Überwachung etabliert und so die Versorgungsqualität verbessert werden.

## 2 Elektrische Impedanztomographie der Lunge

Die EIT ermöglicht die bettseitige Visualisierung des Beatmungszustands und liefert wichtige Informationen zu regionaler Compliance, Ventilationsverzögerungen und der Gasverteilung in der Lunge. Dadurch können die Beatmungseinstellungen individuell angepasst und Lungenschäden durch Überbeanspruchung des Gewebes vermieden werden. Gleichzeitig unterstützt die Methode das medizinische Personal dabei, das Konzept der lungenprotektiven Beatmung zu erlernen und korrekt umzusetzen [2], [3].

### 2.1 Funktionsweise

Das Funktionsprinzip der EIT beruht auf der Messung von Widerstandsänderungen im Lungengewebe gegenüber Wechselströmen. Hierzu werden Elektroden auf dem Brustkorb angebracht, über die elektrische Ströme in das Gewebe eingespeist und die resultierenden Spannungen erfasst werden. Da verschiedene Gewebearten unterschiedliche elektrische Eigenschaften besitzen und sich diese mit dem Luftgehalt der Lunge verändern, können daraus dynamische Schnittbilder rekonstruiert werden [2], [3].

Obwohl die EIT eine geringere räumliche Auflösung als die Computertomographie bietet, liefert sie wertvolle funktionelle Informationen. In Echtzeit lässt sich die elektrische Leitfähigkeit des Lungengewebes analysieren. Entzündungen oder Gewebsschäden verändern die regionale Impedanz und damit den Stromfluss. Dies wird in den Aufnahmen sichtbar, wie der Vergleich in Abbildung 1 zeigt: Eine Lungenentzündung führt dazu, dass der rechte Lungenflügel im unteren Abschnitt nicht belüftet wird. Während CT-Aufnahmen belüftete Bereiche schwarz darstellen, erscheinen diese in der EIT als blaue Umrisse; eine hellere Färbung weist auf eine stärkere Belüftung hin. Zwar kann die EIT aufgrund ihrer begrenzten räumlichen Auflösung keine detaillierten Pathologien oder Strukturen abbilden, dennoch liefert sie ausreichend Informationen, um den Beatmungszustand von Patienten zuverlässig zu beurteilen [2], [3], [4], [5].

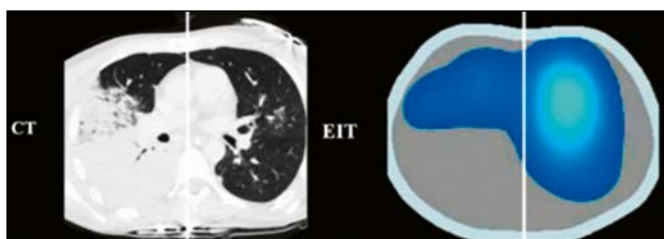


Abbildung 1: Bildvergleich CT und EIT [5]

### 2.2 PulmoVista 500

Der PulmoVista 500 ist ein Lungenfunktionsmonitor, der die Technologie der elektrischen Impedanztomographie nutzt, um thorakale Bioimpedanz nicht-invasiv, strahlungsfrei und kontinuierlich zu erfassen. Er erstellt Querschnittsaufnahmen der Lunge, die ventilationsbedingte Veränderungen des Gewebes sichtbar machen und somit belüftete von nicht-belüfteten Arealen unterscheiden. Das Gerät ist für die klinische Anwendung konzipiert und kann direkt am Patientenbett eingesetzt werden [3].

Für die Messung wird ein Elektroden-Gürtel mit 16 Elektroden im Bereich des vierten bis sechsten Interkostalraums angelegt, ergänzt durch eine Referenzelektrode am Abdomen. Diese gewährleistet gleiche elektrische Potenziale zwischen den Elektrodenpaaren. Ein definierter Wechselstrom („I<sub>1</sub>“) wird jeweils durch ein Elektrodenpaar geleitet, während die übrigen 13 Paare die resultierenden Oberflächenpotenziale („V<sub>n</sub>“) erfassen [4].

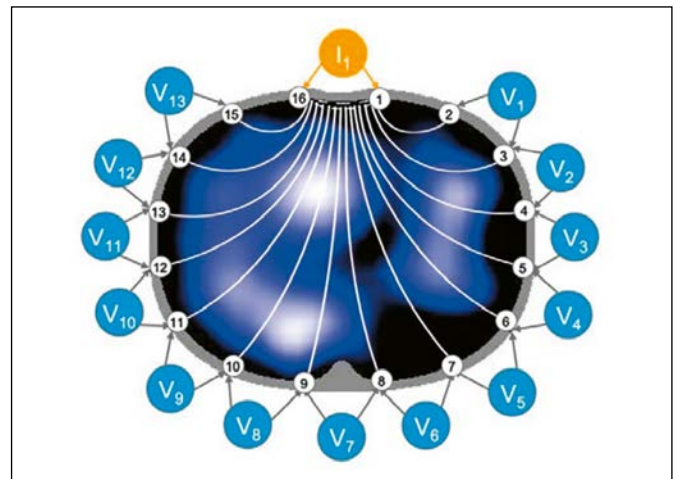


Abbildung 2: Messprinzip des PulmoVista [3]

Der Strom wird nacheinander auf alle Elektrodenpaare verteilt, wodurch pro Zyklus 208 Messwerte entstehen (16 Spannungsprofile mit je 13 Messungen). Ein vollständiger Messzyklus entspricht einem Frame, das die Grundlage zur Rekonstruktion eines Schnittbilds bildet. Zur Bildgenerierung wird ein FEM-basierter linearisierter Newton-Raphson-Rekonstruktionsalgorithmus eingesetzt, der die Spannungsprofile kombiniert und filtert, um Artefakte zu minimieren. Die resultierende Aufnahme umfasst eine 32×32-Pixel-Matrix und wird in caudo-cranialer Schnittebene dargestellt. Der PulmoVista bietet zudem fünf verschiedene Ansichten, die je nach Fragestellung detaillierte Einblicke in die Lungenfunktion ermöglichen [3].

## 3 Methodisches Vorgehen

Diese Forschungsarbeit verwendet eine qualitative Fallstudienmethodik [6], [7]. Es wurde ein eingebettetes Einzelfalldesign gewählt, welches vielfältige Perspektiven

auf das zu untersuchende Phänomen ermöglicht. Die Implementierung der EIT im klinischen Alltag am Beispiel eines Maximalversorgers stellt den Hauptfall dar. Die Subsysteme bilden hier das medizinische Personal und die zu betreuenden Patienten auf der Intensivstation. Diese Untersysteme wurden anschließend weiter unterteilt. Die Daten wurden durch eine immersive ethnographische Untersuchung über einen Beobachtungszeitraum von neun Monaten erhoben und umfassen neben den teilnehmenden Beobachtungen Interviews, Besprechungen, Telefonate, E-Mailverkehr, Firmendokumente, Homepages, Gesetze und Regulierungen und wissenschaftliche Veröffentlichungen. Die Triangulation verschiedener Datenquellen verbessert dabei die Konstruktvalidität.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Konzepterstellung

Zu Beginn wurde die Ausgangssituation auf der Intensivstation des Maximalversorgers analysiert, um die bestehenden Abläufe der Abteilung zu erfassen und darauf aufbauend ein stationsspezifisches Implementierungskonzept zu entwickeln. Dabei wurden zwei eng verknüpfte Subsysteme definiert: Zum einen sollte das medizinische Personal im Rahmen der Fallstudie den Umgang mit dem PulmoVista 500 direkt am Krankenbett erlernen, zum anderen wurde eine Patientengruppe ausgewählt, die invasiv beatmet und respiratorisch auffällig war. Mithilfe der EIT galt es, die Beatmungssituation zu beurteilen und Beatmungsparameter zu überprüfen. So konnte das Personal die Handhabung des Lungenfunktionsmonitors trainieren und gleichzeitig die Beatmungssituation verbessern, wodurch beatmungsassoziierte Lungenschäden (VALI) verhindert werden konnten [8].

Eine der häufigsten Komplikationen auf Intensivstationen ist das akute Lungenversagen (Acute Respiratory Distress Syndrome, ARDS), eine entzündliche Lungenschädigung, die durch alveoläre Schäden und eine erhöhte Gefäßpermeabilität gekennzeichnet ist. Die mechanische Beatmung ist dabei ein zentrales Behandlungselement, weshalb für eine lungenprotektive Ventilation detaillierte Informationen zu Druckkonzepten, Beatmungseinstellungen und Rekrutierungsmanövern erforderlich sind [9]. Die EIT liefert diese Informationen bettseitig, nicht-invasiv und in Echtzeit, ohne dass Patienten durch einen Transport zusätzlichen Risiken ausgesetzt werden [2].

In der Fallstudie wurde eine Patientengruppe mit schwer ausgeprägtem ARDS untersucht, da sich die deutlichen Lungenschäden besonders gut mit der EIT darstellen ließen. Ziel war es, mithilfe des Lungenfunktionsmonitors ein patientenindividuelles Beatmungskonzept mit optimalem positivem endexpiratorischem Druck (PEEP) und niedrigem Tidalvolumen zu entwickeln. Für die präzise

PEEP-Bestimmung stellt der PulmoVista eine spezielle Ansicht bereit.

### 4.2 Fallstudie

Die Fallstudie erstreckte sich über drei Monate. Ziel war es, mithilfe des PulmoVista 500 den optimal an den Beatmungszustand angepassten PEEP zu ermitteln und eine lungenschonende Beatmung sicherzustellen. Zur Überprüfung der Interpretation der Impedanztomographiedaten sowie zur Bewertung der Effekte auf ARDS-Patienten wurden vor und nach den Anpassungen Blutgasanalysen durchgeführt. Dabei wurde insbesondere der Oxygenierungsindex (Horovitz-Index) dokumentiert, der das Verhältnis des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks zur inspiratorischen Sauerstoffkonzentration beschreibt [10].

Ein festgelegter Testablauf sah vor, über einen definierten Zeitraum verschiedene PEEP-Werte einzustellen und diese mit dem PulmoVista aufzuzeichnen. Anschließend konnten am Lungenfunktionsmonitor die relevanten Atemzonen ausgewählt und analysiert werden. Die durch den PulmoVista 500 bereitgestellten Bild- und Kurvdaten ermöglichten es dem medizinischen Personal, den jeweils geeigneten PEEP-Wert für ein lungenprotektives Beatmungskonzept zu bestimmen. Dieser Wert wurde am Beatmungsgerät übernommen, woraufhin die Patienten unter den neuen Bedingungen für 30 Minuten beatmet wurden. Danach erfolgte eine erneute Blutgasanalyse, um den Effekt der Umstellung auf die Sauerstoffsättigung zu prüfen. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

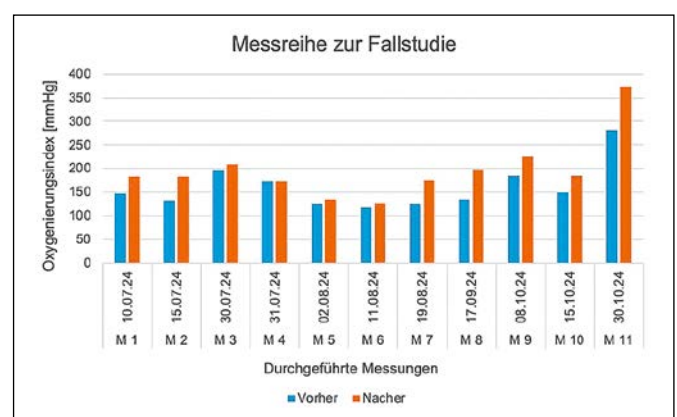


Abbildung 3: Messreihe der Fallstudie

## 5 Diskussion

### 5.1 Bewertung der Ergebnisse

Wie das Balkendiagramm in Abbildung 3 zeigt, konnten über einen Zeitraum von zwölf Wochen insgesamt elf Patienten in die Fallstudie aufgenommen werden. Bis auf Messung vier ist bei allen ventilierten Personen eine

deutliche Verbesserung des Beatmungszustandes, nach Anpassung der Parameter mit dem PulmoVista 500, eingetreten. Beim Patienten vom 31.07.2024 konnte anhand der Aufzeichnung im Nachgang festgestellt werden, dass hier eine zu niedrige Signalqualität vorlag, welche Ursache für das Ausbleiben einer Verbesserung mit den ermittelten Werten erklärt.

## 5.2 Implementierungskonzept

Für die erfolgreiche Implementierung des PulmoVista 500 auf der Intensivstation am Beispiel des Maximalversorgers wurde das Gerät als unterstützendes Instrument in die bestehenden Abläufe integriert. Dazu wurde zunächst das bisherige Vorgehen zur Umsetzung eines lungenprotektiven Beatmungskonzeptes analysiert. Auf dieser Grundlage entstand ein Implementierungskonzept, welches den Impedanztomographen gezielt in die Stationsroutine einbindet. Dieses Vorgehen gewährleistete eine hohe Akzeptanz bei den Anwendern und förderte den nachhaltigen Einsatz der Technologie.

Dieses Konzept kann aber nicht auf jedes Krankenhaus übertragen werden. Für den gezielten Einsatz der EIT in der klinischen Praxis ist es erforderlich, ein an den jeweiligen Kliniktyp angepasstes Implementierungsschema zu entwickeln. Da sich die strukturellen Voraussetzungen, personellen Ressourcen und technischen Möglichkeiten zwischen Universitätskliniken, Schwerpunktkrankenhäusern und kleineren Versorgungseinrichtungen erheblich unterscheiden können, muss die Einführung der elektrischen Impedanztomographie entsprechend differenziert erfolgen. Ein solches maßgeschneidertes Vorgehen

ermöglicht es, die Technologie optimal in bestehende klinische Abläufe zu integrieren. Nur so kann das Verfahren sein volles Potenzial entfalten und dazu beitragen, lungenprotektive Beatmungsstrategien gezielt und zuverlässig umzusetzen. Dadurch wird nicht nur die individuelle Patientenversorgung verbessert, sondern auch die langfristige Etablierung der EIT als Routineverfahren in der Beatmungstherapie unterstützt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das Ziel, den PulmoVista 500 erfolgreich in die klinischen Arbeitsprozesse der Intensivstation eines Maximalversorgers zu integrieren, erreicht wurde. Ebenso konnte das Gerät in die bestehenden Verfahren zur Umsetzung eines lungenprotektiven Beatmungsansatzes eingebunden werden. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch, dass sich Struktur und Tiefe der Implementierung von Klinik zu Klinik deutlich unterscheiden, wodurch eine direkte Übertragbarkeit des Konzepts nicht gewährleistet ist.

Für eine breitere Einführung der EIT in unterschiedlichen klinischen Kontexten könnten stufenweise Implementierungskonzepte, angepasst an verschiedene Krankenhausstrukturen, einen entscheidenden Beitrag leisten. Eine erhöhte Akzeptanz bei den Anwendern würde zudem die Häufigkeit der OPS-Codierung steigern und damit die Grundlage für eine mögliche Verknüpfung mit einer DRG-Fallpauschale schaffen. Die Prüfung dieses ökonomischen Aspekts bietet ein relevantes Potenzial für weiterführende Forschungsarbeiten.

---

## Referenzen:

- [1] F. Pennati, A. Angelucci, L. Morelli, S. Bardini, E. Barzanti, F. Cavallini, A. Conelli, G. Di Federico, C. Paganelli, and A. Aliverti, Electrical Impedance Tomography: From the Traditional Design to the Novel Frontier of Wearables, *Sensors* (Basel, Switzerland), vol. 23, no. 3, p. 1182, Jan. 2023.
- [2] D. Maciejewski, Z. Putowski, M. Czok, and Ł. J. Krzych, Electrical impedance tomography as a tool for monitoring mechanical ventilation. An introduction to the technique, *Advances in Medical Sciences*, vol. 66, no. 2, pp. 388-395, Sep. 2021.
- [3] P. Friederich, Al Riz, Susanne, und S. Rederlechner, „Visuell geführte lungenprotektive Beatmung – Anwendungsbuch“.
- [4] B. Lobo, C. Hermosa, A. Abella, und F. Gordo, „Electrical impedance tomography“, *AnnTransl Med*, Bd. 6, Nr. 2, S. 26, Jan. 2018, doi: 10.21037/atm.2017.12.06
- [5] M. C. Bachmann u. a., „Electrical impedance tomography in acute respiratory distresssyndrome“, *Crit Care*, Bd. 22, S. 263, Okt. 2018, doi: 10.1186/s13054-018-2195-6.
- [6] R. K. Yin, *Case study research and applications: Design and methods*, 6th ed., Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC, Melbourne, Sage, 2018.

- [7] K. M. Eisenhardt, M. E. Graebner, Theory building from cases: opportunities and challenges, *Academy of Management Journal*, 50, pp. 25-32, 2007.
- [8] R. Larsen und A. Mathes, „Maschinelle Beatmung: Grundlagen, Klassifikation und Verbreitung“, in *Beatmung: Indikationen – Techniken – Krankheitsbilder*, R. Larsen und A. Mathes, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2023, S. 241-259. doi: 10.1007/978-3-662-64536-9\_12.
- [9] H. Banavasi, P. Nguyen, H. Osman, und A. O. Soubani, „Management of ARDS – What Works and What Does Not“, *Am J Med Sci*, Bd. 362, Nr. 1, S. 13-23, Juli 2021, doi: 10.1016/j.amjms.2020.12.019.
- [10] 2.12 Oxygenierungsindex („Horovitz-Index“), 8., Überarbeitete Auflage. Thieme Verlag, 2008. doi: 10.1055/b-0034-22850.

**Projektpartner:**

Dräger TGM GmbH, 23558 Lübeck

**KONTAKT**



**Prof. Dr. Dr. Stefanie Steinhauser**

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

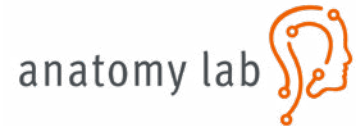
s.steinhauser@oth-aw.de



**Jana Hetzer, M.Sc.**

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

# Innovative Lernräume in der Anatomie-Lehre



## Zusammenfassung

Das neu geschaffene Anatomy Lab der OTH Amberg-Weiden stellt einen innovativen Lernraum dar, der die Vermittlung anatomischer Grundlagen durch den Einsatz von Spatial Computing neu gestaltet. Anstelle traditioneller Lehrformen wird Anatomie hier als immersives, interaktives Erlebnis vermittelt. Mithilfe von 30 Apple Vision Pro Headsets und der Lernsoftware 3D Organon werden physische und virtuelle Lernräume miteinander verknüpft. Das Konzept ermöglicht es, ganze Lehrveranstaltungen in Mixed Reality durchzuführen und fördert kollaboratives, räumlich-dynamisches Lernen. Neben der Anwendung in den Studiengängen Medizintechnik, Medical Engineering und Physician Assistance dient das Anatomy Lab als Plattform für interdisziplinäre Studierendenprojekte, in denen neue didaktische und technologische Ansätze erprobt werden. Begleitende Forschungsarbeiten untersuchen die Wirksamkeit immersiver Lernmethoden hinsichtlich Motivation, räumlichem Vorstellungsvermögen und Lernleistung. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Verbindung analoger und digitaler Lernformen den Wissenstransfer signifikant verbessert. Darüber hinaus wird das Konzept in externen Bildungssettings, wie im Projekt *Anatomy Lab on the Road*, erprobt, um auch Schülerinnen und Schülern naturwissenschaftliche Inhalte durch räumliches Erleben zugänglich zu machen.

## Abstract

The newly established Anatomy Lab at OTH Amberg-Weiden represents an innovative learning environment that redefines the teaching of anatomical fundamentals through the use of spatial computing. Instead of traditional teaching methods, anatomy is presented as an immersive and interactive experience. Using 30 Apple Vision Pro headsets and the learning software 3D Organon, physical and virtual learning spaces are seamlessly connected. The concept enables entire courses to be conducted in mixed reality and promotes collaborative, spatially dynamic learning. In addition to its application in the degree programs Medical Engineering and Physician Assistance, the Anatomy Lab serves as a platform for interdisciplinary student projects that explore new didactic and technological approaches. Accompanying research examines the effectiveness of immersive learning methods with regard to motivation, spatial reasoning, and learning performance. Initial results indicate that combining analog and digital learning formats significantly improves knowledge transfer. Furthermore, the concept is being tested in external educational contexts, such as the project *Anatomy Lab on the Road*, which aims to make scientific content accessible to school students through spatial and experiential learning.

## 1 Einleitung

Die Vermittlung anatomischer Grundlagen stellt Hochschulen für angewandte Wissenschaften vor besondere Herausforderungen. Im Gegensatz zu medizinischen Fakultäten verfügen sie nicht über klassische Anatomie-Institute oder Präparationssäle. Anatomisches Wissen muss daher auf neue, praxisorientierte und technikge-

stützte Weise erfahrbar gemacht werden. An der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurde mit dem Anatomy Lab ein innovativer Lernraum geschaffen, der die Anatomie-Lehre grundlegend neu denkt. Im Mittelpunkt steht nicht mehr das statische Lernen am Modell, sondern dessen Erweiterung und Transformation durch Spatial Computing – eine Technologie, die physische und virtuelle Räume miteinander verschmelzen

lässt. Anatomie wird somit nicht mehr nur vermittelt, sondern räumlich erlebbar gemacht (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Anatomy Lab der OTH Amberg-Weiden – innovativer Lernraum für anatomische Lehre mit Spatial Computing. Oben: Lernumgebung mit anatomischen Modellen. Unten: Apple Vision Pro-Headsets als zentrale Hardware für die immersive Lehre.

## 2 Methodisches Vorgehen

Das Anatomy Lab ist mit 30 Apple Vision Pro Headsets [1] ausgestattet und damit eine der größten Spatial-Computing-Lernumgebungen an einer Hochschule für angewandte Wissenschaften in Deutschland. Die Apple Vision Pro basiert auf dem Konzept des Spatial Computing, bei dem digitale Inhalte nahtlos in die reale Umgebung eingebettet werden. Die Umgebung wird nicht ausgeblendet, sondern durch digitale Objekte erweitert. Anatomische Strukturen erscheinen dabei holografisch im Raum und können aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, vergrößert oder in einzelne Komponenten zerlegt werden. Die Brille verfügt über hochauflösende Displays (pro Auge kommen Displays mit einer Auflösung von 3.660 x 3.200 Pixeln zum Einsatz), ein präzises 3D-Tracking-System und eine intuitive Steuerung über Handgesten, Augenbewegungen und Sprachbefehle. Dadurch entsteht eine immersive Lernerfahrung, die eine natürliche, fast greifbare Interaktion mit den anatomischen Modellen ermöglicht.

Als zentrale Lernsoftware kommt aktuell im Anatomy Lab 3D Organon zum Einsatz – eine Anwendung für medizinische Ausbildung und anatomisches Lernen in virtuellen und erweiterten Realitäten [2]. Mit mehr als 4.000 inter-

aktiven 3D-Strukturen des menschlichen Körpers bietet 3D Organon eine umfassende, wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Lehre. Studierende können Organe, Muskeln, Gefäße und Nerven schichtweise ein- und ausblenden, Funktionsbewegungen simulieren oder anatomische Systeme im Detail analysieren (vgl. Abbildung 2). In Kombination mit der Apple Vision Pro entsteht so ein interaktiver Lernraum, in dem der menschliche Körper nicht nur betrachtet, sondern in seiner räumlichen und funktionellen Komplexität erlebt werden kann.



Abbildung 2: Immersives Lernen in Mixed-Reality. Darstellung anatomischer Strukturen werden holografisch neben dem haptischen Skelett (oben und mittig) und haptischen Herzmodell (unten) eingeblendet im Anatomy Lab Weiden.

Die Ausstattung mit 30 Headsets ermöglicht es, ganze Lehrveranstaltungen immersiv durchzuführen. Studierende

können gleichzeitig in Kleingruppen arbeiten, gemeinsam Modelle betrachten und sich innerhalb der virtuellen Umgebung austauschen. Das Lernsetup ist zudem mobil konzipiert, siehe Abbildung 3. Die Headsets können flexibel transportiert und auch außerhalb der Hochschule eingesetzt werden, etwa an Pflegeschulen oder anderen Bildungseinrichtungen. So lässt sich das Konzept des Anatomy Lab ortsunabhängig nutzen und auf unterschiedliche Bildungskontexte übertragen. Zur sicheren Lagerung und Ladung der Headsets wird ein spezieller Ladeschrank genutzt, der eine geordnete und brandschutzgerechte Aufbewahrung ermöglicht. Diese Infrastruktur schafft ideale Bedingungen, um den Einsatz von Spatial Computing systematisch in die Lehre zu integrieren und seine Wirksamkeit wissenschaftlich zu evaluieren.

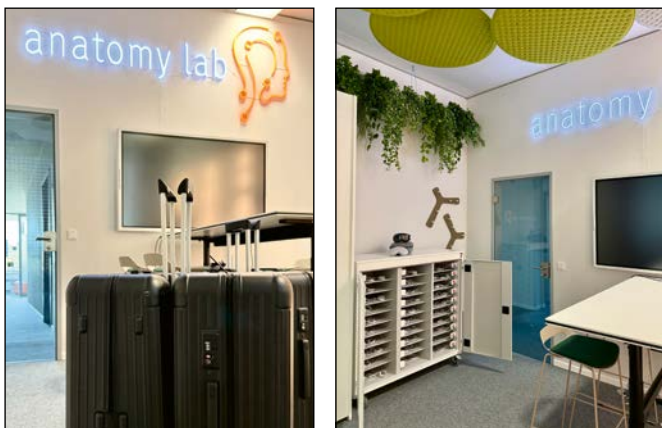


Abbildung 3: Ortsungebundener Einsatz der Ausstattung des Anatomy Labs. Oben und unten links: Transport der Headsets. Unten rechts: Sicherheitskonformes und simultanes Laden der Headset Akkus.

### 3 Ergebnisse

Zentrale Anwendung findet das Spatial Computing aktuell in der Lehre der Studiengänge Medizintechnik; Medical Engineering und Physician Assistance (vgl. Abbildung 4). Dort wird das Anatomy Lab als Bestandteil der anatomischen Grundlagenmodule eingesetzt. Studierende bearbeiten Lernaufgaben, die reale Modelle und virtuelle Darstellungen kombinieren: Sie erfassen topografische

Strukturen am physischen Modell und in Mixed-Reality-Umgebungen. Durch die direkte Verknüpfung von analogem und digitalem Lernen wird das räumliche Verständnis vertieft und der Wissenstransfer zwischen unterschiedlichen Darstellungsebenen gefördert.



Abbildung 4: Innovatives VR-Praktikum im Studiengang Physician Assistant: Mit 3D Organon und der Apple Vision Pro erforschen Studierende anatomische Strukturen in virtueller Realität – oben: Anwendung im Unterricht, unten: Studierendengruppe nach dem VR-Praktikum.

Neben der Integration in bestehende Lehrveranstaltungen bildet das Anatomy Lab auch den Rahmen für interdisziplinäre Studierendenprojekte. Hier arbeiten Studierende der Medizintechnik, Informatik und des Gesundheitswesens gemeinsam an der Weiterentwicklung der immersiven Lernumgebung. In Projekt- und Abschlussarbeiten werden neue Interaktionsformen, Benutzeroberflächen und didaktische Szenarien erprobt. So entstehen beispielsweise Anwendungen, die Studierenden ermöglichen, individuelle Lernpfade zu gestalten oder anatomische Strukturen kollaborativ in Echtzeit zu analysieren. Darüber hinaus dient das Anatomy Lab als Forschungs-umgebung, in der die Wirksamkeit von Spatial Computing in der Lehre empirisch untersucht wird. Laufende Projekte befassen sich mit der Frage, wie sich der immersive Lernansatz auf das räumliche Vorstellungsvermögen, die Motivation und die langfristige Behaltensleistung der Studierenden auswirkt. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Kombination aus realem und virtuellem Lernen den Lernerfolg steigert und den Wissenstransfer in praxisnahe Kontexte erleichtert. Begleitende Evaluationen werden durch qualitative Befragungen und standardisierte Leistungstests ergänzt, um sowohl subjektive als auch objektive Lerngewinne zu erfassen.



Abbildung 5: *Anatomy Lab on the Road* – Virtuelle Reise durch den menschlichen Körper im Biologieunterricht. Im Rahmen eines Praxisprojekts der OTH Amberg-Weiden mit dem Melanchthon-Gymnasium Nürnberg erlebten 60 Schülerinnen und Schüler der 10. Klassen immersive Anatomie in der virtuellen Realität. Links: Technischeinführung. Rechts: Bearbeiten des Anatomie-Quiz mit der Apple Vision Pro und 3D Organon.

Neben den hochschulinternen Lehrprojekten werden im Anatomy Lab auch Kooperationen mit externen Partnern erprobt. Im Rahmen von Transferaktivitäten wurde das Konzept etwa im Schulkontext vorgestellt, um das Potenzial immersiver Lernräume auch für die naturwissenschaftliche Bildung zu demonstrieren. Solche Outreach-Formate, wie das Projekt *Anatomy Lab on the Road*, verdeutlichen die Anschlussfähigkeit des Konzepts über die Hochschullehre hinaus (vgl. Abbildung 5). Im Mittelpunkt steht dabei stets das Ziel, komplexe biologische Zusammenhänge durch räumliches Erleben verständlich zu machen.

#### 4 Zusammenfassung

Mit dem Anatomy Lab entsteht an der OTH Amberg-Weiden ein beispielhafter Lernraum, der die Grenzen traditioneller Anatomie-Lehre überwindet und die Möglichkeiten des Spatial Computings didaktisch ausschöpft. Der Ansatz zeigt, dass innovative Technologien nicht nur bestehende Lehrmethoden ergänzen, sondern Lernprozesse grundlegend transformieren können. Anatomie wird hier nicht nur über Abbildungen oder Präparate vermittelt, sondern über räumliche Interaktion, Perspektivwechsel und digitales Erleben. Damit wird Lernen zu einem aktiven, explorativen Prozess, der Wissen nicht nur vermittelt, sondern erfahrbar macht.

[www.oth-aw.de/anatomy-lab](http://www.oth-aw.de/anatomy-lab)

---

## Referenzen:

- [1] Apple Inc., Apple Vision Pro – Technical Overview, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.apple.com/apple-vision-pro/> [abgerufen am: 15. Oktober 2025].
- [2] 3D Organon, Immersive Anatomy, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3dorganon.com/immersive-anatomy/> [abgerufen am: 15. Oktober 2025].

## KONTAKT



**Prof. Dr.-Ing. Eva Rothgang**

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

[e.rothgang@oth-aw.de](mailto:e.rothgang@oth-aw.de)



**Sonja Waldt, M.Sc.**

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

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



**David Powering, M.Sc.**

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

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

# Proof of Concept eines 3D-gedruckten Herzphantoms für SPECT-CT-Diagnostik und In-Vitro-TLD-Dosimetrie

## Zusammenfassung

Die präzise Bestimmung organspezifischer Strahlendosen ist für die Bewertung nuklearmedizinischer Verfahren essenziell. Konventionelle Phantome weisen jedoch Limitierungen hinsichtlich anatomischer Genauigkeit und Gewebeäquivalenz auf. Mit additiven Fertigungstechnologien eröffnet sich die Möglichkeit, patientennahe Organmodelle herzustellen. In dieser Arbeit wurde ein funktionales 3D-gedrucktes Herzphantom entwickelt und mittels TLD-Dosimetrie sowie quantitativer SPECT/CT validiert. Die Hounsfield-Einheiten des Phantoms zeigten eine hohe Übereinstimmung mit klinischen CT-Daten, und die flexible Segmentierung erlaubte eine Anpassung der Myokardvolumina. Die TLD-Messungen im aktiv mit Tc-99m gefüllten Myokard korrelierten eng mit den Bildgebungsdaten, wobei SPECT/CT-Overlays Optimierungspotenzial hinsichtlich der Homogenität der Aktivitätsverteilung aufzeigten. Das vorgestellte Phantom bestätigt damit seine Eignung für die präzise Organdosimetrie und bietet eine Basis für zukünftige Arbeiten zur Simulation pathophysiologischer Veränderungen und zur weiteren Validierung klinischer Protokolle.

## Abstract

Accurate determination of organ-specific radiation doses is essential for the evaluation of nuclear medicine procedures. Conventional phantoms, however, are limited in anatomical accuracy and tissue equivalence. Additive manufacturing technologies now offer the opportunity to create patient-specific organ models. In this study, a functional 3D-printed heart phantom was developed and validated using TLD dosimetry and quantitative SPECT/CT. The phantom's Hounsfield units showed high agreement with clinical CT data, and flexible segmentation allowed adaptation of myocardial volumes. TLD measurements in Tc-99m-filled myocardium correlated closely with imaging data, while SPECT/CT overlays revealed optimization potential regarding activity distribution homogeneity. The presented phantom thus confirms its suitability for precise organ dosimetry and provides a foundation for future work on simulating pathophysiological alterations and further validation of clinical protocols.

## 1 Einleitung

Die Bestimmung der Strahlenexposition in der Radiologie und Nuklearmedizin ist essenziell für die Bewertung von Risiken diagnostischer und therapeutischer Verfahren. Seit vielen Jahren kommen hierfür Phantome zum Einsatz, die als Ersatz für den menschlichen Körper dienen und eine Abschätzung organspezifischer Dosen ermöglichen. Konventionell gefertigte Phantome sind jedoch meist nur näherungsweise anatomisch korrekt und bilden die komplexen Gewebeeigenschaften des Menschen nur eingeschränkt ab. Damit ist die In-vivo-Dosimetrie weiter-

hin mit Unsicherheiten behaftet und stellt eine erhebliche Herausforderung dar.

Mit der Einführung additiver Fertigungstechnologien, insbesondere des 3D-Drucks, eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Herstellung anatomisch präziser und patientenäquivalenter Phantome. Durch gezielte Auswahl geeigneter Filamente und Druckparameter können die schwächenden Eigenschaften menschlicher Gewebe, wie etwa Hounsfield-Einheiten, realitätsnah nachgebildet werden. Gleichzeitig lässt sich durch die Nutzung gewebsäquivalenter Materialien die Kompatibilität mit

Radiopharmaka sicherstellen. Besonders komplex gestaltet sich die Entwicklung von Herzphantomen, da beim menschlichen Herzen nur der linke Ventrikel eine relevante Anreicherung des Radiopharmakons aufweist.

Um diese Limitationen zu überwinden, wird die Kombination verschiedener methodischer Ansätze verfolgt. Hierzu zählen der Einsatz digitaler Zwillinge für eine patientenspezifische Übertragung pathophysiologischer Veränderungen auf 3D-gedruckte Organmodelle, die Nutzung quantitativer SPECT-Bildgebung sowie die Wiederbelebung der Thermolumineszenz-Dosimetrie (TLD) zur Erfassung organspezifischer Dosiswerte. Auf diese Weise können sowohl Standardprotokolle als auch individuelle Therapie- und Diagnoseszenarien simuliert und überprüft werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Potenziale 3D-gedruckter gewebsäquivalenter Phantome in Kombination mit TLD-Dosimetrie und quantitativer SPECT für die präzise und patientennahe Dosimetrie aufzuzeigen. Dabei liegt ein besonderer Fokus auf der Entwicklung eines funktionalen Herzphantoms sowie auf der Validierung der Methodik für verschiedene Radiopharmaka und Dosisprotokolle.

## 2 Material und Methoden

### A. Phantomkonstruktion

Ausgehend von einem patientenspezifischen CT-Datensatz wurde an der OTH Amberg-Weiden ein dreiteiliges, anatomisch korrektes Herzphantom entwickelt. Es besteht aus einem Ventrikelsystem und einem äußeren Herzbeutel, konstruiert auf Grundlage eines CAD-Modells und im 3D-Druckverfahren (PLA+) gefertigt. Die Herzwände wurden durch eine 3 mm dicke PLA+-Schicht nachgebildet, zwei weitere Halbschalen (3 mm) bilden den Perikard-Raum. Durch den Hohlraum im Phantom, gefüllt mit einer gelartigen Masse (Agar-Agar) wird das Myokard simuliert. Der modulare Aufbau erlaubt zudem die gezielte Integration pathophysiologischer Veränderungen, z. B. Defekte im linken oder rechten Ventrikel sowie im Septum. Die HU-Werte können sowohl für native CT-Aufnahmen als auch für kontrastmittelgestützte Aufnahmen angepasst werden.



Abbildung 1: Links: Herzinneres mit einer Herzbeutelhälfte und dem Freiraum zur Myokardsimulation (oranger Pfeil). Rechts: Vollständig zusammengebautes Herzphantom

### B. Dosimetrie

Für die organspezifische Dosisbestimmung wurden Thermolumineszenz-Dosimeter (TLDs, Typ MCP N) eingesetzt. Insgesamt wurden  $3 \times 20$  TLD-Discs kalibriert, paarweise wasserdicht verpackt und auf der Herzoberfläche positioniert. Neun Messpunkte mit jeweils zwei TLDs erfassten die Dosis am Herzphantom, ein weiteres TLD-Paar diente zur Bestimmung der Hintergrundexposition. Die Kalibrierung erfolgte mittels eines eigens entwickelten Tc-99m-Wasserphantoms. Die Auswertung erfolgte automatisiert über ein TLD-Reader-System (Lexysmart, RadPro). Die Messzeit betrug 23 min, entsprechend der Dauer der SPECT-Akquisition.

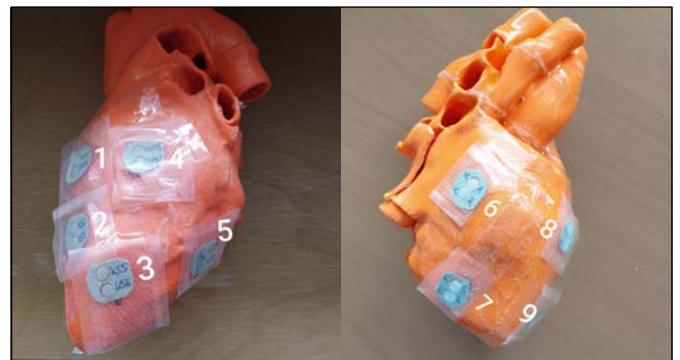


Abbildung 2: Messpositionen auf der linken (1-5) sowie rechten (6-9) Herzhälfte

### C. Bildgebung und Einbettung

Zur Validierung wurde das Herzphantom in ein wassergefülltes, nicht-aktives Thoraxphantom eingebettet, das zusätzlich gewebeäquivalente Nachbarstrukturen wie Rippen, Wirbelsäule und Lungen beinhaltet. Der Proof-of-Concept erfolgte an einem SPECT/CT-System (Siemens Symbia Intevo Bold) unter Verwendung von Tc-99m mit einer Aktivität von  $A = 12,3$  MBq. Dabei wurde insbesondere die Dosisverteilung auf dem linken, mit Aktivität angereicherten Ventrikel im Vergleich zum inaktiven rechten Ventrikel erfasst.

## 3 Ergebnisse

Die Bestimmung der Hounsfield-Einheiten (HU) für Myokardgewebe aus CT-Aufnahmen des menschlichen Herzens ergab Werte von  $40 \pm 9$  HU ohne und  $114 \pm 7$  HU mit Kontrastmittel, was den in der Literatur berichteten Ergebnissen entspricht. Durch die gezielte Anpassung der HU-Werte mittels Beimengung von  $\text{CuSO}_4$  konnte eine Reproduzierbarkeit erreicht werden, hierbei wurden Konzentrationen von 6,2 mg/ml (ohne Kontrastmittel) bzw. 25 mg/ml (mit Kontrastmittel) ermittelt, die den Referenzwerten entsprechen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Die Bestimmung der HU-Werte aus der CuSO<sub>4</sub>-Reihe für Herzmuskulatur ohne/mit Kontrastmittel ergab 6,2 bzw. 25 mg/ml und entsprechen den HU-Werten aus der Literatur.

HU	7	11	21	39	65	109	264	463	635
CuSO <sub>4</sub> [mg/ml]	0	1,2	2,4	6,2	12,6	25,0	62,4	135	250

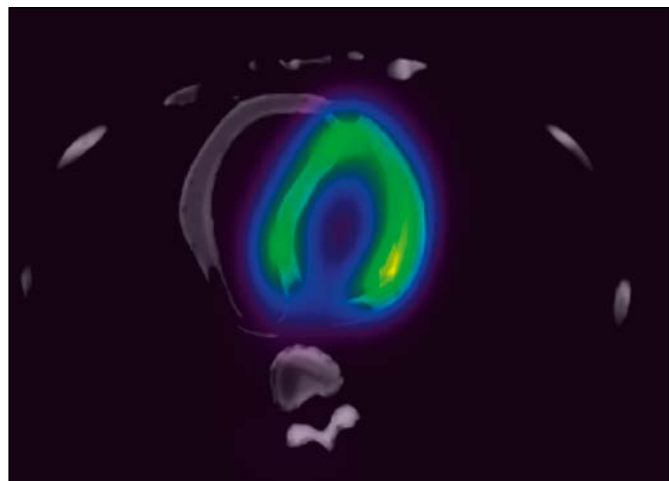


Abbildung 3: SPECT/CT-Aufnahme des mit Tc-99m dotierten Herzens und der sich daraus ergebenden Dosisverteilung

Im Rahmen der Dosisverteilung zeigte sich jedoch eine deutliche Inhomogenität, bedingt durch die ungleichmäßige Verteilung von Tc-99m im simulierten Myokard. Dies konnte qualitativ durch SPECT/CT-Aufnahmen (vgl. Abb. 3) bestätigt werden. Der maximale Dosisunterschied trat im Bereich des linken Ventrikels zwischen den Messpositionen 1 und 5 auf und betrug etwa 40%. Auf der rechten, inaktiven Ventrikelseite lag die maximale Abweichung hingegen lediglich bei 7% (Messpositionen 6 und 8). Im direkten Vergleich zwischen den Ventrikeln entsprach die Dosis des rechten Ventrikels etwa 20-25% der des linken Ventrikels. Trotz dieser Unterschiede weist die geringe Standardabweichung zwischen den Messreihen auf eine hohe Reproduzierbarkeit der Befüllung mit Tc-99m-haltigem Agar-Agar hin (vergleiche Tabelle 2).

Tabelle 2: Dosismittelwerte und Standardabweichungen über fünf Messungen exemplarisch am orangenen Herzphantom

Position	Dosismittelwert [μGy]	Standardabweichung [μGy]
1	19,84	4,13
2	23,21	2,33
3	24,31	2,93
4	30,40	2,82
5	31,21	2,02
6	6,07	0,35
7	5,81	0,41
8	5,66	0,61
9	5,75	1,57

Ziel der weiteren Versuchsreihen war es daher, eine möglichst homogene Dosisverteilung in den 3D-gedruckten Herzmodellen (orange, grau, weiß) zu realisieren; siehe Abbildung 4 und Tabelle 3.



Abbildung 4: CT-Schnitte durch die drei Herzen. Links: oranges Herz; Mitte: weißes Herz; Rechts: graues Herz

Tabelle 3: Zielsetzung einer homogenen Dosisverteilung. Normiert auf 10 MBq Tc-99m Gesamt-Aktivität

Position	Herz weiß [μGy]	Herz grau [μGy]	Herz orange [μGy]
1	30,0	16,5	16,1
2	26,8	24,8	19,7
3	21,8	16,5	22,6
4	37,3	21,6	29,1
5	32,5	25,9	31,7
6	7,9	5,7	6,6
7	6,8	5,3	6,3
8	6,1	7,5	5,7
9	7,5	6,2	7,4

#### 4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Umsetzung eines 3D-gedruckten Herzphantoms erfolgreich realisierbar ist. Die Hounsfield-Einheiten des Phantoms erwiesen sich als gut vergleichbar mit klinischen CT-Daten, und die flexible Segmentierung ermöglicht eine Anpassung der Myokardvolumina an unterschiedliche Fragestellungen. Zudem konnte die Durchführung einer TLD-Dosimetrie am aktiv mit Tc-99m gefüllten Myokard etabliert werden, wobei eine hohe Korrelation zu den Ergebnissen der SPECT- und SPECT/CT-Bildgebung erzielt wurde. Gleichzeitig offenbaren die Überlagerungen der SPECT/CT-Datensätze Optimierungspotenzial hinsichtlich der Homogenität der Aktivitätsverteilung. Insgesamt bestätigt die Kombination von Bildgebung und Dosismessung die Eignung des entwickelten Herzphantoms für nuklearmedizinische Anwendungen, insbesondere für die Bestimmung von Organdosen. Zukünftige Arbeiten werden darauf abzielen, die bestehende Inhomogenität der Dosisverteilung durch Anpassung der Phantomgeometrie zu reduzieren. Darüber hinaus sollen quantitative Analysen und der Vergleich mit kardiologischen Untersuchungen durchgeführt werden, um auch die Simulation pathophysiologischer Myokard-erkrankungen im 3D-Herzmodell zu ermöglichen.

---

**Projektpartner:**

Universitätsklinikum Regensburg, Abteilung für Nuklearmedizin, Regensburg

**KONTAKT**



**Agnes Pöllmann, M.Sc.**

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

[a.poellmann@oth-aw.de](mailto: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](mailto:r.ringler@oth-aw.de)

# Simulationen beschleunigen die Prüfungsverfahren der ASTM F2213 & F2052 für Implantate bei der MRT-Diagnostik

## Zusammenfassung

Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist eine zentrale Bildgebungstechnologie, die ohne ionisierende Strahlung auskommt, jedoch besondere Risiken für Implantat-Trägerinnen und -Träger birgt. Um den hohen Aufwand zur Prüfung gemäß MR-Safety zu reduzieren, wurde eine simulationsgestützte Methodik entwickelt. Grundlage ist eine in Ansys Electronics Desktop implementierte Plattform, welche digitale Zwillinge von Implantaten in realitätsnahen Magnetfeldern abbildet. Ergänzt wird diese durch eine Magnetfelddatenbank auf Basis semi-automatischer 3D-Kartierungen sowie durch Prüfkörpermessungen nach ASTM-Standards zur Validierung. Die Ergebnisse zeigen eine enge Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung, jedoch eine hohe Sensitivität gegenüber der relativen magnetischen Permeabilität, während Feldstärkeänderungen nur geringen Einfluss haben. Zukünftige Arbeiten fokussieren sich auf die adäquate Repräsentation der Materialeigenschaften durch Aufzeichnung vollständiger B-H-Kurven sowie auf den Einfluss von Herstellungs- und Legierungsvarianten, um die Genauigkeit simulationsgestützter Sicherheitsbewertungen von Implantaten weiter zu steigern.

## Abstract

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a key imaging technology that avoids ionizing radiation but poses specific safety risks for patients with implants. To reduce the effort of MR-safety testing, a simulation-based methodology was developed. The core is an Ansys Electronics Desktop-based platform representing digital twins of implants in realistic magnetic fields, complemented by a magnetic field database from semi-automated 3D mappings and by ASTM-standard test body measurements for validation. Results demonstrate close agreement between simulations and experimental data, but reveal high sensitivity to relative magnetic permeability, while field strength variations showed only minor influence. Future work will focus on correct representation of material properties by recording complete B-H curves and analysing the impact of manufacturing methods and alloy variations to further enhance the accuracy of simulation-based implant safety assessments.

## 1 Einleitung

Die Magnetresonanztomographie (MRT) stellt heute eine Schlüsseltechnologie in der medizinischen Bildgebung dar. Sie ermöglicht eine hochauflösende und nichtinvasive Darstellung anatomischer Strukturen und funktioneller Prozesse, ohne die Patientinnen und Patienten ionisierender Strahlung – wie etwa bei Röntgen- oder CT-Verfahren – auszusetzen. Trotz dieser Vorteile ergeben sich bei der Anwendung der MRT besondere Herausforderungen im Hinblick auf die Sicherheit von Implantat-Trägerinnen

und -Trägern. Aktive wie auch passive Implantate können durch die starken Magnetfelder in Bewegung geraten, sich verdrehen oder sich durch Hochfrequenz Effekte erwärmen. Zudem besteht das Risiko von Fehlfunktionen elektronischer Systeme.

Um diese Gefahren zu minimieren, ist der Nachweis der sogenannten MR-Safety zwingend erforderlich. Implantate müssen vor der klinischen Anwendung entsprechend geprüft und mit einem Sicherheitssiegel (Labeling) versehen werden. Angesichts einer stetig wachsenden Zahl

an MRT-Untersuchungen – bedingt durch eine höhere Lebenserwartung, eine steigende Prävalenz chronischer Erkrankungen und die fortschreitende Entwicklung patientenindividueller Implantate mittels additiver Fertigung – stoßen die etablierten Prüfmethode jedoch zunehmend an ihre Kapazitätsgrenzen.

Eine wesentliche Schwierigkeit besteht darin, dass Prüfungen bislang häufig nur durch aufwändige Einzelmessungen direkt an MRT-Systemen erfolgen können. Der Zugang zu diesen Systemen ist in Kliniken und radiologischen Praxen aufgrund der hohen Auslastung jedoch stark eingeschränkt. Darüber hinaus steht nur eine begrenzte Anzahl spezialisierter Prüflabore zur Verfügung, die das notwendige Labeling von Implantaten durchführen können. Als Teilansatz zur Lösung dieses Problems werden zunehmend automatisierte Verfahren entwickelt, welche die Bestimmung relevanter physikalischer Größen wie Drehmoment oder translatorischer Kraft gemäß den Standards ASTM F2213 und ASTM F2052 ermöglichen. Diese Entwicklungen eröffnen Perspektiven für eine effizientere und skalierbare Sicherstellung der MR-Sicherheit von Implantaten.

## 2 Material und Methoden

Zur Reduzierung des Prüfaufwands und als (Teil-)Ersatz manueller Messungen wurde eine simulationsgestützte Methodik entwickelt, die Worst-Case-Szenarien bereits im Vorfeld bestimmt und perspektivisch eine rein virtuelle Prüfung von Standardimplantaten ermöglicht. Kern dieser Methodik ist eine Simulationsplattform auf Basis von Ansys Electronics Desktop®, in die Implantate als digitale Zwillinge in repräsentative statische  $B_0$ -Felder verschiedener MRT-Systeme eingebracht werden können. Hierdurch lassen sich magnetisch induzierte Kräfte und Drehmomente gemäß den einschlägigen ASTM-Standards numerisch bestimmen.

Zur Sicherstellung der physikalischen Realitätsnähe wurde eine Magnetfeld-Datenbank aufgebaut, die auf semi-automatischen 3D-Kartierungen von MRT-Systemen im Bereich 0,3–3 T basiert. Die Datenerfassung erfolgte mit einem 3-Achsen-Teslameter, welches durch eine gesonderte Konstruktion systematisch Messpunkte abgreift. Gesteuert wird dies über eine eigens entwickelte Software, welche auf einem Arduino Mega mit aufgesetztem CNC-shield und C++ Code basiert. Eine geeignete Oberfläche zur Bedienung am Laptop wurde in VisualBasic.net programmiert. Die so gewonnenen Magnetfeld-daten wurden in die Simulationsumgebung übertragen, um die feldspezifischen Effekte unterschiedlicher MRT-Systeme realitätsgetreu abzubilden, was insbesondere für die Simulation der Kräfte von Bedeutung ist.

Die Präzision der Simulationen wurde durch eigens entwickelte Prüfkörper validiert, deren Materialeigenschaften

weitgehend bekannt und reproduzierbar sind (hergestellt aus V2A-Edelstahl DIN 1.4301). Diese Prüfkörper wurden sowohl konventionell gemäß ASTM-Standards auf Drehmoment und translatorische Kraft vermessen als auch als digitale Zwillinge in die Simulation eingebracht. Der Abgleich der experimentellen Messwerte mit den Simulationsergebnissen diente der Kalibrierung und Validierung der entwickelten Methodik. Abbildung 1 zeigt eine Auswahl dieser Prüfkörper.

Durch die Kombination aus Simulationsplattform, Magnetfeld-Datenbank und Prüfkörperentwicklung konnte ein strukturierter Workflow etabliert werden, der von der Überführung klassischer Kraft- und Drehmomentprüfungen in eine virtuelle Umgebung, über die Bestimmung von Worst-Case-Szenarien bis hin zur vollständig virtuellen Prüfung standardisierter Implantate reicht.



Abbildung 1: Verschiedene Prüfkörpergeometrien: Hüftimplantat, IPG, Radiusplatte (+ Zylinderprobe)

## 3 Ergebnisse

Die Simulation berechnet das resultierende Drehmoment eines Implantats oder Prüfkörpers an 36 Positionen, was einer Drehung um  $360^\circ$  in  $10^\circ$ -Schritten entspricht. Abbildung 2 zeigt den digitalen Zwilling eines an ein Hüftimplantat angelehnten Prüfkörpers im homogenen  $B_0$ -Feld (grün) von rund 2,9 T. Im dargestellten Schnittbild der x-y-Ebene sind die resultierenden Magnetfeldänderungen im Prüfkörper an einer der 36 Positionen zu sehen. Das externe Magnetfeld ist hierbei in z-Richtung orientiert. Durch Aufzeichnung des simulierten Drehmoments gegenüber der aktuellen Winkelposition in Grad ergibt sich eine Kurve, welche eine enge Analogie zu den Messungen am MRT-System aufweist und bestätigt damit grundsätzlich die Validität des Ansatzes.

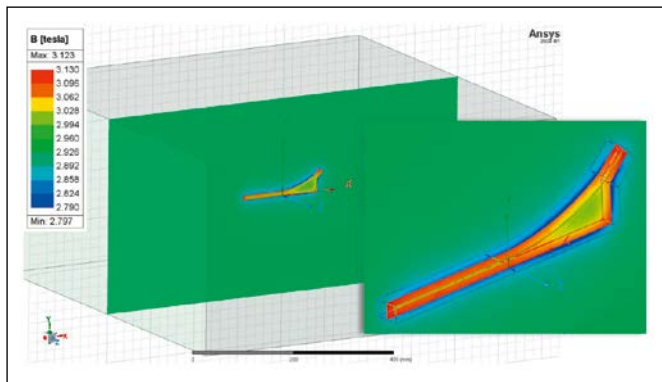


Abbildung 2: Resultierendes Magnetfeld im Prüfkörper; Schnittbild in der x-y-Ebene des digitalen Zwillings „Hüftimplantat“ im homogenen  $B_0$ -Feld in z-Richtung

Besonders deutlich wurde die hohe Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den gewählten Materialparametern. Insbesondere die relative magnetische Permeabilität ( $\mu_r$ ) erwies sich als maßgeblicher Einflussfaktor: bereits geringe Variationen führten zu signifikanten Änderungen der berechneten Drehmomente. Deutlich wird dies in Tabelle 1. Sie zeigt, dass eine Erhöhung von  $\mu_r$  um 0,001 eine Zunahme des Drehmoments um 86,2 % zur Folge hat. Typischerweise wird  $\mu_r$  jedoch in Materialdatenblättern nicht bis auf drei Nachkommastellen angegeben. Im Gegensatz dazu zeigten vergleichsweise große Änderungen der Magnetfeldstärke (bis zu 0,1 T) nur einen geringen Einfluss auf das Drehmoment, wie in Tabelle 2 dargestellt. Die Variation von  $B_0$  in der Tabelle ist dabei bereits extrem gewählt, in einem kubischen Bereich von 30 cm um das Isozentrum konnte bei einem Siemens-Magnetom-Vida-3-T-System eine Standardabweichung von lediglich 0,008 T festgestellt werden. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass eine präzise Definition der Mate-

Tabelle 1: Kleine Änderungen des Materialparameters in der Simulation haben große Auswirkungen auf das Drehmoment

$B$ (konstant)	$\mu_r$	Relative Erhöhung $\mu_r$	Drehmoment-Ergebnis der Simulation	Relative Erhöhung des Drehmoments
2,9 T	1,028	-	1,45 mNm	-
2,9 T	1,038	<b>0,97 %</b>	2,7 mNm	<b>+ 86,2 %</b>
2,9 T	1,048	<b>1,95 %</b>	4,3 mNm	<b>+ 196,6 %</b>

Tabelle 2: Relativ große Änderungen in der Magnetfeldstärke (0,1 T) haben nur kleine Auswirkungen auf das Drehmoment

$\mu_r$ (konstant)	$B_0$	Relative Erhöhung $B_0$	Drehmoment-Ergebnis der Simulation	Relative Erhöhung des Drehmoments
1,028	2,7 T	-	1,3 mNm	-
1,028	2,8 T	<b>3,7 %</b>	1,4 mNm	<b>+ 7,7 %</b>
1,028	2,9 T	<b>7,41 %</b>	1,5 mNm	<b>+ 15,4 %</b>
1,028	3,0 T	<b>11,11 %</b>	1,6 mNm	<b>+ 23,1 %</b>

Tabelle 3: Simulation vs. Konventionelle Messung: Drehmoment nach Finetuning von  $\mu_r$  im Bereich von  $1,02 < \mu_r < 1,09$

Prüfkörper	Simuliertes Drehmoment (max.)	Gemessenes Drehmoment (max.)	Fehler
Zylinderprobe	1,45 mNm	1,44 mNm	0,69 %
Radiusplatte	1,11 mNm	1,06 mNm	4,5 %
IPG	84,03 mNm	84,25 mNm	0,26 %
Hüftimplantat	412,6 mNm	405,9 mNm	1,62 %

rialeigenschaften essenziell für die Zuverlässigkeit der Simulation ist und größere Relevanz besitzt als moderate Abweichungen in der externen Magnetfeldstärke.

Durch Herstellungsverfahren, mechanische Bearbeitung und weitere Einflussfaktoren kann sich  $\mu_r$  signifikant ändern. Dies wird jedoch in Materialdatenblättern für unsere Anwendung nicht ausreichend genau berücksichtigt und lässt sich nicht ohne Weiteres messen. Durch Angleichen der relativen magnetischen Permeabilität in unserer Simulation innerhalb eines durch o. g. Einflussfaktoren plausiblen Bereichs von  $1,02 < \mu_r < 1,09$  für das verwendete Material DIN 1.4301 konnten Simulationsergebnisse nahe der realen Vermessung erreicht werden. Eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse gibt Tabelle 3.

#### 4 Fazit und Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass die relative magnetische Permeabilität einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Simulationen magnetisch induzierter Kräfte und Drehmomente besitzt. Da sich die Permeabilität nicht-linear verhält und in Abhängigkeit von der lokalen Flussdichte variiert, ist ihre Bestimmung mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Gängige Messgeräte sind in der Regel auf konstante Magnetfeldstärken ausgelegt und liefern somit nur eingeschränkte Informationen für die simulationsgestützte Abbildung realer Bedingungen. Für eine präzise Modellierung wäre jedoch die vollständige B-H-Kurve der gesamten Implantat-Geometrie erforderlich, so dass  $\mu_r$  stets der aktuellen magnetischen Flussdichte entspricht. Zwar existieren Messmethoden, die eine derartige B-H-Kurvenaufnahme ermöglichen (z. B. Vibrating-Sample-Magnetometer oder SQUID-Magnetometer), diese sind jedoch in der Praxis auf sehr kleine Proben im Millimeterbereich beschränkt. Ein direkter Transfer der Messkurven auf makroskopische Implantate oder Prüfkörper ist aufgrund zahlreicher Gefüge beeinflussender Faktoren wie Herstellungsverfahren, Nachbearbeitung oder geringfügige Legierungsänderungen nicht möglich.

Ein zentrales Ziel zukünftiger Arbeiten ist daher die systematische Untersuchung dieser Einflussgrößen. Dazu gehört der Vergleich verschiedener Fertigungs- und

Bearbeitungstechniken (z. B. Laserschneiden versus Wasserstrahlschneiden) bei der Herstellung von Prüfkörpern, ebenso wie die Erfassung von B-H-Kurven kleiner Materialproben und deren gezielte Übertragung in die Simulation. Ergänzend sollen auch die Auswirkungen kleiner Legierungsvariationen, etwa zwischen V2A- und V4A-Edelstahl, auf die resultierenden Drehmomente quantifiziert werden. Auf diese Weise kann ein fundierteres Verständnis der materialspezifischen Eigenschaften

gewonnen und die Genauigkeit simulationsgestützter Sicherheitsbewertungen von Implantaten weiter gesteigert werden.



Images used courtesy of ANSYS, Inc.

---

### **Projektpartner:**

MR:comp GmbH, 45894 Gelsenkirchen

### **Fördergeber:**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **KONTAKT**



**Joshua Igl, M.Sc.**

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

[j.igl@oth-aw.de](mailto:j.igl@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](mailto:r.ringler@oth-aw.de)

# Entwicklung eines skalierbaren, bidirektionalen DC/DC-Wandlers auf Basis von Standard-Wechselrichtern

## Zusammenfassung

Im Labor für Elektrische Maschinen und Antriebe werden für Testaufbauten in der Regel unterschiedliche Gleichspannungslevel benötigt. Da die zu untersuchenden Antriebs- und leistungselektronischen Systeme in der Regel auch rückspeisefähig sind, müssen die Gleichspannungsquellen elektrische Leistung nicht nur bereitstellen, sondern auch aufnehmen können. Zwar gibt es am Markt eine Vielzahl an bidirektionalen Quellen, jedoch sind diese in der Regel sehr teuer.

Aus diesem Grund wurde ein skalierbarer, bidirektionaler DC/DC-Wandler entworfen und realisiert. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass der Wandler die gestellten Anforderungen vor allem im Hinblick auf Flexibilität und Dynamik erfüllt.

## Abstract

In the Laboratory for Electrical Machines and Drives, different DC voltage levels are usually required for common test setups. Since the investigated drive and power electronic systems are typically also capable of recuperation, the DC voltage sources must not only provide electrical power but also be capable of regenerative feeding. Although there are a number of bidirectional sources available on the market, these are usually very expensive.

For this reason, a scalable, bidirectional DC/DC converter was planned, designed and implemented. The achieved results show that the converter meets the requirements with respect to flexibility and dynamics.

---

## 1 Einleitung

Im Bereich der Antriebstechnik haben sich für verschiedene Anwendungsgebiete unterschiedliche Zwischenkreisspannungslevel etabliert. So wird beispielsweise im Bereich der Industrieantriebe typischerweise eine Zwischenkreisspannung von 600 V gewählt, welche durch einen Netzgleichrichter bereitgestellt wird. Bei Traktionsantrieben im PKW-Bereich hingegen sind 400 V oder 800 V anzutreffen, je nach gewählter Batteriesystemspannung.

Häufig ist es mit diesen Antriebssystemen nicht nur möglich, Lasten motorisch anzutreiben, sondern auch generatorisch in den Zwischenkreis zu rekuperieren. Die zurückgespeiste Energie wird dann in der Batterie gespeichert oder, im Fall eines aktiven Netzgleichrichters, in das Drehstromnetz zurückgespeist.

Für Testaufbauten im Labor werden daher zur Speisung dieser Antriebe häufig Gleichspannungsquellen mit variablem Gleichspannungspegel (DC/DC-Wandler) benötigt, welche nicht nur Leistung bereitstellen, sondern auch aufnehmen können (bidirektionale Quellen). Zwar sind derartige Spannungsquellen für hohe Leistungen am Markt verfügbar, jedoch sind die damit verbundenen Kosten sehr hoch.

Im Folgenden wird daher eine skalierbare, bidirektionale Gleichspannungsquelle vorgestellt, die im Labor für Elektrische Maschinen und Antriebe der Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik der OTH Amberg-Weiden entwickelt und erfolgreich aufgebaut und getestet wurde.

## 2 Zielsetzung und resultierender Aufbau

Zu Beginn der Arbeiten wurde eine Reihe von Anforderungen definiert, die der zu entwickelnde Wandler für den Laborbetrieb erfüllen muss. Diese lauten:

- 1 Einfacher Aufbau:** Die Hardware-Topologie soll möglichst einfach sein und mit wenig Bauteilaufwand bidirektionalen Betrieb ermöglichen.
- 2 Skalierbarkeit:** Zukünftige Strom- und Leistungsanforderungen sollen durch Skalierbarkeit der Komponenten einfach umsetzbar sein.
- 3 Flexible Verwendung der Hardware:** Die genutzte Hardware, gerade im Hinblick auf die Leistungselektronik, soll käuflich erwerblich sein. Ebenso soll diese auch anderweitig nutzbar sein, wenn der DC/DC-Wandler nicht benötigt wird.
- 4 Verwendung eigener Signal- und Reglerelektronik:** Die bereits entwickelte und vielfach eingesetzte Elektronik zur Signalverarbeitung und Regelung soll genutzt werden.
- 5 Regelung des Ausgangsstroms- und der Ausgangsspannung:** Die Ausgangsspannung soll geregelt werden, um eventuelle Lastsprünge dynamisch ausgleichen zu können. Zudem soll der maximale Ausgangsstrom einstellbar sein, so dass die angeschlossene Last sowie das System selbst vor eventuellen Beschädigungen geschützt werden können.

Um die Anforderung eines **einfachen Aufbaus** erfüllen zu können, wurde entschieden, den DC/DC-Wandler als sogenannten Zwei-Quadrantensteller mit Stromumkehr (Abbildung 1) auszuführen [1]. Diese Topologie basiert auf einer IGBT- oder MOSFET-Halbbrücke, welche eine Standardschaltung der Leistungselektronik darstellt. Zudem wird für jede Halbbrücke eine Drossel benötigt. Diese Bauteile sind in der Regel nicht vorkonfektioniert zu kaufen. Vielmehr ist eine Auslegung für die Zielapplikation notwendig, was in Kapitel 2 detailliert beschrieben wird.

Durch diese Topologie lässt sich ebenso die Forderung nach **Skalierbarkeit** sehr einfach umsetzen, da durch die Parallelschaltung mehrerer Halbbrücken der Ausgangsstrom, und damit auch die Ausgangsleistung, erhöht werden kann.

Die beiden vorangegangenen Anforderungen sowie die Forderung nach einer **flexiblen Verwendung der Hardware** lassen sich am leichtesten durch Verwendung eines Standard-Industriewechselrichters erfüllen. Dieser besteht prinzipbedingt aus drei Halbbrücken. Soll der Ausgangsstrom erhöht werden, kann einfach ein weiterer Wechselrichter parallelgeschaltet werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Wechselrichter als einfache Motorwechselrichter zu verwenden, wenn der DC/DC-Wandler nicht benötigt wird.

Bereits seit mehreren Jahren wird im Labor für Elektrische Maschinen und Antriebe eine **selbst entwickelte Signal- und Reglerelektronik** verwendet, durch die handelsübliche Motorwechselrichter als offene und skalierbare Leistungselektronik genutzt werden können. Hierfür muss die in den Geräten verbaute Reglerelektronik entfernt und durch die eigene Elektronik ersetzt werden. Durch diesen Umbau können die sechs leistungselektronischen Schalter unabhängig angesteuert werden. Die notwendigen Schaltsignale werden in der Regel über ein Rapid-Control-Prototyping (RCP)-System der Firma dSPACE vorgegeben, welches die leistungselektronischen Schalter über eine Elektronikbaugruppe ansteuert. Auf diesem RCP-System der Baureihe SCALEXIO können eigene Regelalgorithmen, wie beispielsweise die geforderte **Regelung des Ausgangsstroms- und der Ausgangsspannung**, in Echtzeit ausgeführt und die Leistungselektronik angesteuert werden (Abbildung 1). Die gewählte Reglertopologie und Reglerauslegung sowie die erreichbare Reglerdynamik werden in Kapitel 3 beschrieben.

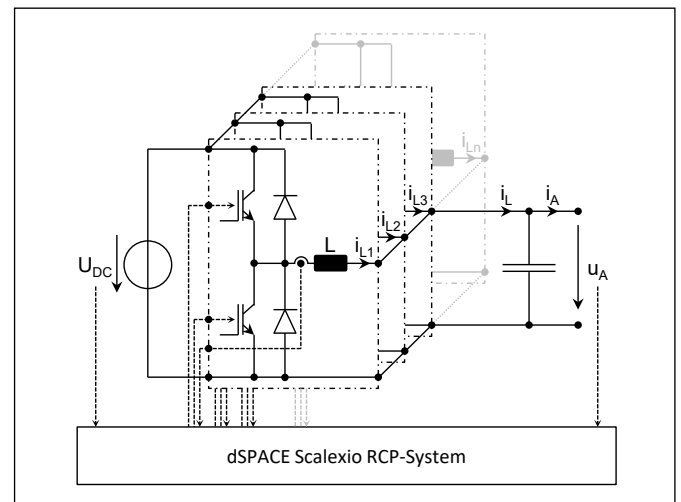


Abbildung 1: Aufbau eines n-fach Synchronwandlers

## 3 Drossel

Die Drossel ist ein zentrales Bauteil des Zwei-Quadrantenstellers, ohne deren richtige Dimensionierung der Wandler nicht oder nur eingeschränkt funktioniert.

Der Zweck der Induktivität ist die kurzzeitige Speicherung von Energie, welche während eines Schaltzustands einer Halbbrücke (z. B. oberer Schalter ein, unterer Schalter aus) zugeführt und im jeweils anderen Zeitabschnitt (z. B. oberer Schalter aus, unterer Schalter ein) wieder abgegeben wird. Bei der Energiespeicherung wird elektrische Energie in magnetische Energie umgewandelt, welche im magnetischen Feld des Luftspalts der Drossel gespeichert ist. Diese Energie wird bei der Abgabe wieder in elektrische Energie umgewandelt [2]. Der gesamte Vorgang wiederholt sich mit der Schaltfrequenz einer Halbbrücke.

Die Auslegung der Drossel soll folgenden Worst-Case-Betriebspunkt ermöglichen:

- Maximaler mittlerer Laststrom: 14 A
- Maximaler Stromrippel: 6 A
- Maximale PWM-Frequenz: 8 kHz
- Maximale Eingangsspannung: 600 V
- Einstellbereich für Ausgangsspannung: 0 V bis Eingangsspannung

### 3.1 Auslegung

Ein wesentlicher Punkt bei der Auslegung der Drossel ist die Wahl des Kernmaterials. Da der Großteil der magnetischen Energie im Luftspalt einer Drossel gespeichert wird, benötigen alle Speicherdrosseln einen solchen.

Bei Verwendung von Ferritkernen ist konstruktiv ein dedizierter Luftspalt vorzusehen. Dieser kann mitunter erhöhte Verluste durch Streufelder und erhöhte elektromagnetische Abstrahlung zur Folge haben. Der größte Nachteil der Ferrite ist jedoch die geringe Sättigungsflussdichte im Bereich von 250 bis 500 mT, weshalb für die vorgestellte Anwendung Metallpulverkerne verwendet wurden. Bei der Herstellung von Metallpulverkernen wird Eisenpulver zusammen mit einem isolierenden Binder und geringen Mengen anderer Materialien zusammengepresst [3]. Die Isolation zwischen den Eisenpartikeln wirkt dabei wie ein verteilter Luftspalt, weshalb für die Energiespeicherung im Kern kein zusätzlicher Luftspalt nötig ist, was die damit einhergehenden unerwünschten Effekte reduziert. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist die hohe Sättigungsflussdichte von bis zu 2 T.

Bei der Auslegung der Drossel wurden unterschiedliche Kernmaterialien in Betracht gezogen und eine Grobauslegung vorgenommen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher Kernmaterialien (Auszug) [4]

Kernmaterial Kerngeometrie	Kool M $\mu$ Toroid	Kool M $\mu$ UI-Kern	Kool M $\mu$ Ultra Toroid	Edge Toroid
Abmessungen in mm	d=133	80x60x25	d=133	d=75
Induktivität in mH	3,6	3,8	3,7	3,7
Windungszahl N	346	238	264	187
max. Flussdichte $B_{max}$ in mT	300	350	410	780
spez. Kernverluste $P_V$ in W	0,8	0,2	0,6	1,9

Die Baugröße der Drossel stellt für die vorliegende Anwendung ein untergeordnetes Kriterium dar, von Relevanz sind für die Regelung der Gesamtschaltung dagegen vor allem das lineare Verhalten der Drossel sowie niedrige Verluste. Daher sind alle Kerne außer dem Kern aus dem Material „Edge“ für die Umsetzung geeignet. Die U- und I-Kerne fallen allerdings, ebenso wie der Kern aus Kool M $\mu$  Ultra, in die Kategorie der Spezialanfertigungen und sind weder beim Hersteller noch bei Distributoren in geringen Stückzahlen verfügbar. Daher wurde für die Induktivität der Toroid-Kern aus Kool M $\mu$  gewählt.

### 3.2 Vermessung

Die angefertigten Drosseln wurden im Labor vermessen. Hierfür wurde eine Spannung in Höhe von 600 V für eine definierte Zeitdauer an die Drossel angelegt und der Verlauf von Drosselspannung  $u_L$  und Drosselstrom  $i_L$  gemessen. Abbildung 2 oben zeigt den resultierenden Verlauf beider Größen. Es ist erkennbar, dass der Strom in ca. 300  $\mu$ s von 0 A auf ungefähr 70 A ansteigt, während der Spannungsabfall über der Drossel nahezu konstant 600 V beträgt. Zur Berechnung der resultierenden Induktivität L wird die Gleichung

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

ausgewertet. Den resultierenden Verlauf der Induktivität L zeigt Abbildung 2 unten. Aufgrund der Schwingungen von Strom und Spannung während und kurz nach den Schalt Ereignissen können erst ab Strömen größer 4,2 A sinnvolle Werte für die Induktivität ermittelt werden. Es ist erkennbar, dass der Wert der Induktivität bei Strömen kleiner 10 A ungefähr 4,2 mH beträgt, und damit über dem Zielwert von 3,6 mH liegt. Die Differenz der beiden

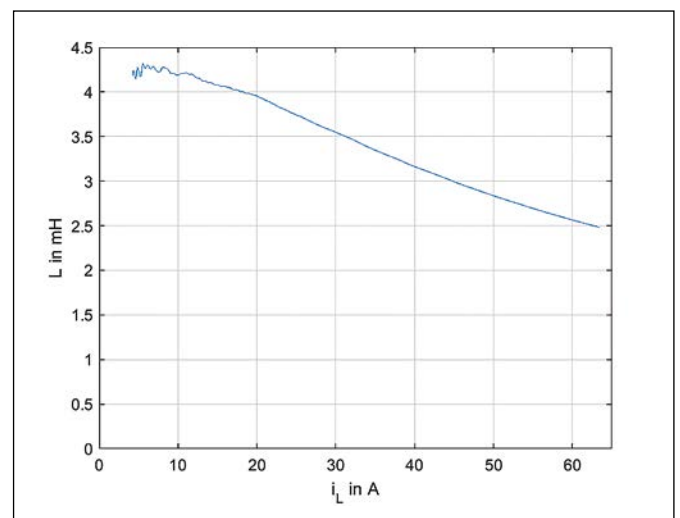
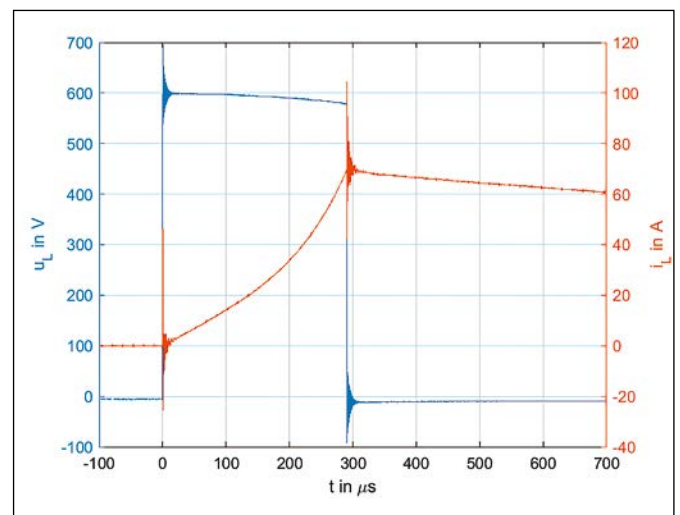


Abbildung 2: Vermessung der Drossel [4]; oben: Strom- und Spannungsverlauf; unten: Verlauf der resultierenden Induktivität

Werte hat ihre Ursache darin, dass bei der Auslegung der Drossel die unteren Werte des Toleranzbereichs der Kernmaterialien aus den Datenblättern genutzt wurden. Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass mindestens der geforderte Zielwert erreicht wird.

Darüber hinaus ist in Abbildung 2 unten erkennbar, dass mit zunehmendem Drosselstrom der Induktivitätswert aufgrund von Sättigung abnimmt. Im relevanten Stromarbeitsbereich bis 20 A ist der Wert jedoch sicher über dem Mindestwert von 3,6 mH.

#### 4 Regelung

Um neben der Ausgangsspannung auch die Drosselströme regeln zu können, wurde eine sogenannte Kaskadenregelung gewählt, welche aus einem Spannungsregler ( $G_{R,u}(s)$ ) mit unterlagerter Stromregelung ( $G_{R,i}(s)$ ) besteht (Abbildung 3). Das Verhalten der Regelstrecke kann in zwei Teile unterteilt werden. Der für die Stromregelung dominierende Anteil ( $G_{L,R}$ ) ist durch die Induktivität und den ohmschen Widerstand der Leitungen charakterisiert. Für den Spannungsregler muss darüber hinaus auch das integrierende Verhalten des Kondensators ( $G_C(s)$ ) berücksichtigt werden.

Für beide Kaskadenstufen wurden PI-Regler gewählt, wobei die Auslegung des Stromreglers nach dem Betragsoptimum, die des Spannungsreglers nach dem Symmetrischen Optimum erfolgte.

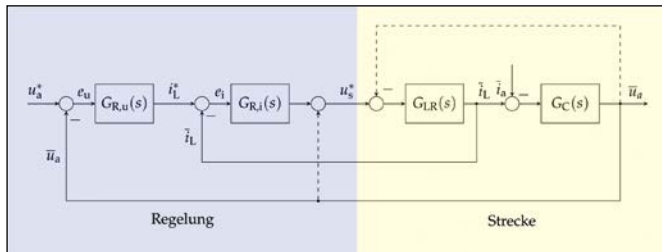


Abbildung 3: Signalflussplan der Regelung und Regelstrecke [5]

#### 5 Messungen

Zur Untersuchung der resultierenden Leistungsfähigkeit und des Verhaltens bei dynamischen Änderungen wurde im Labor für Elektrische Maschinen und Antriebe der Fakultät EMI der OTH Amberg-Weiden ein dreiphasiger Synchronwandler gemäß der in Abbildung 1 dargestellten Topologie aufgebaut. Hierfür wurde die in Kapitel 3 beschriebene Drossel in dreifacher Ausfertigung angefertigt. Ebenso wurde die in Kapitel 4 beschriebene Regelung auf ein dSPACE-RCP-System portiert und dieses über die beschriebenen Elektronikbaugruppen mit einem Pulswechselrichter verbunden. Die Ausgangsspannung des Synchronwandlers wurde durch eine Elko-Kondensatorbatterie mit einer Gesamtkapazität von 1,1 mF geglättet. Die PWM-Frequenz der Leistungsschalter sowie die

Abtastfrequenz der Strom- und Spannungsregelung wurden auf 10 kHz festgelegt. In den nachfolgenden Abbildungen sind die über eine PWM-Periode gemittelten Istwerte dargestellt, gekennzeichnet durch einen Strich über dem Buchstaben (z. B.  $\bar{i}_{L1}$ ).

Für die Vermessung des Systems in unterschiedlichen Betriebspunkten wurden uni- und bidirektionale Quellen von Elektro-Automatik (EA) sowie Leistungswiderstände eingesetzt. Hierdurch war es möglich, unterschiedliche Leistungsflüsse und transiente Laständerungen nachzubilden.

##### 5.1 Untersuchung des Stromregelkreises

Abbildung 4 oben zeigt das Führungsverhalten der Stromregelung des dreiphasigen Synchronwandlers bei einer konstanten Eingangsspannung von 600 V. Der Sollwert des resultierenden Ausgangsstromes  $i_L^*$  springt zum Zeitpunkt  $t = 0$  s von 3 A auf 6 A. Da sich der resultierende Ausgangsstrom  $\bar{i}_L$  aus der Überlagerung der drei Drosselströme  $\bar{i}_{L1}$ ,  $\bar{i}_{L2}$  und  $\bar{i}_{L3}$  ergibt, liefert jeder Zweig nur ein Drittel des Ausgangsstromes. Aus diesem Grund betragen die drei Drosselströme vor dem Sollwertsprung 1 A und danach 2 A. Der Einregelvorgang erfolgt mit einer hohen Dynamik, so dass der Sollwert nach ca. 50 ms erreicht wird. Das Regelverhalten bei negativem Laststrom (Reku- peration) ist nahezu identisch (Abbildung 4 unten).

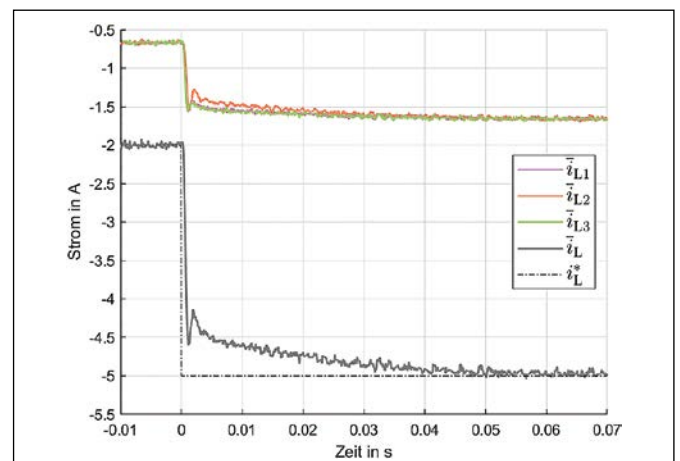
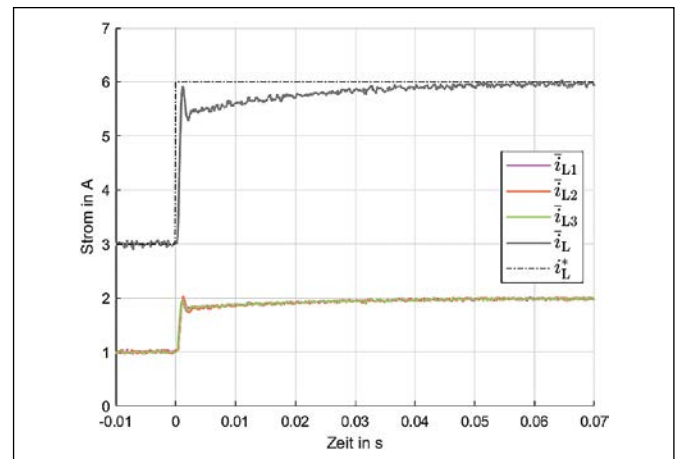


Abbildung 4: Führungsverhalten des Stromregelkreises [6]

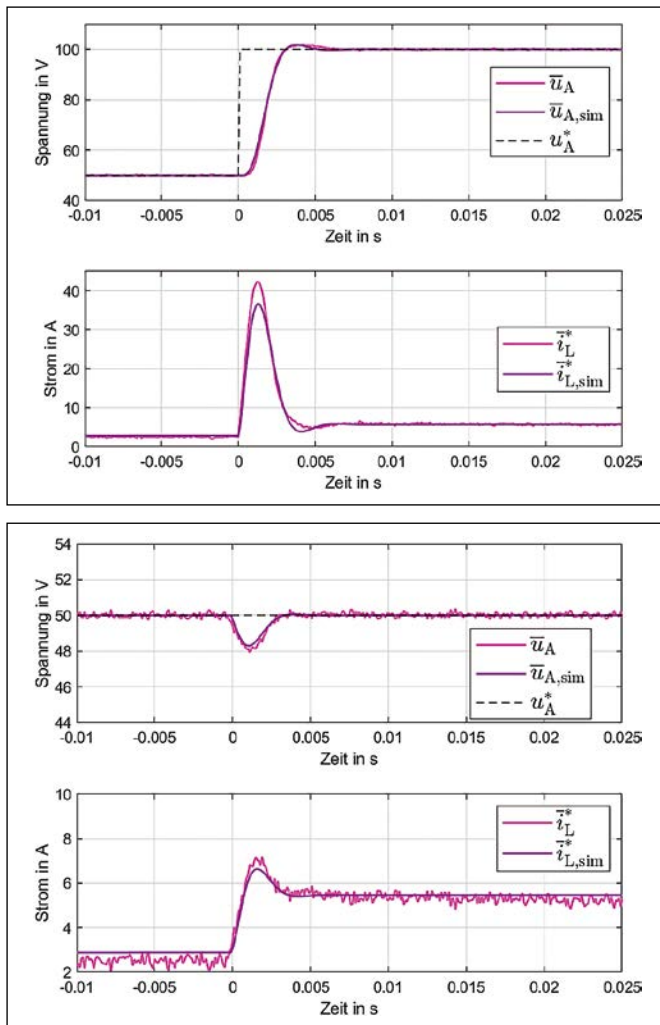


Abbildung 5: Führungsverhalten des Spannungsregelkreises [6]

## 5.2 Untersuchung des Spannungsregelkreises

Das resultierende Führungsverhalten des geschlossenen Spannungsregelkreises mit unterlagerter Stromregelung bei einem Sollwertsprung von 50 V auf 100 V (Eingangsspannung 600 V) im nahezu lastlosen Zustand zeigt Abbildung 5 oben. Es ist gut erkennbar, dass die Sollspannung  $u_A^*$  ca. 5 ms nach dem Sprung erreicht wird. Darüber hinaus zeigt der Vergleich mit dem simulierten Verlauf der Ausgangsspannung  $\bar{u}_{A,sim}$ , dass erwartetes und tatsächliches Verhalten der Spannungsregelung nahezu identisch sind.

Den Verlauf der Ausgangsspannung (Sollspannung 50 V) bei sprunghafter Laständerung von 17  $\Omega$  auf 9  $\Omega$  zeigt Abbildung 5 unten. Die Ausgangsspannung  $\bar{u}_A$  bricht lediglich um maximal 2 V ein, und der gesamte Ausregelvorgang dauert lediglich ca. 3 ms.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

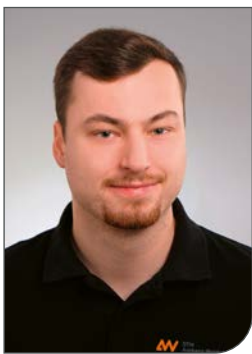
Der entwickelte DC/DC-Wandler erfüllt die definierten Anforderungen in vollem Umfang und zeigt die geforderte Dynamik im Hinblick auf Führungs- und Störsprünge der Spannungs- und Stromregelung.

Der Regelalgorithmus soll in einem nächsten Schritt auf einen normalen uC übertragen werden, so dass sich die Wandlertopologie in Zukunft auch ohne RCP-System in beliebiger Anzahl als kostengünstiges Standalone-System aufbauen lässt.

## Referenzen:

- [1] U. Schlienz, Schaltnetzteile und ihre Peripherie, Dimensionierung, Einsatz, EMV. Wiesbaden, Springer Vieweg, 2020
- [2] E. Boeck, Lehrgang Elektrotechnik und Elektronik, Theoretische Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik mit ihren Anwendungen zur Analyse elektrotechnischer Prozesse, Wiesbaden, 2. Aufl. Springer Vieweg, 2022
- [3] C. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook, Third Edition, Revised and Expanded, Idyllwild, Marcel Dekker, Inc., 2004
- [4] A. Braumüller, Auslegung von Tiefsetzstellerdrosseln für DC-DC Wandler, Bachelorarbeit, OTH Amberg-Weiden, 2025
- [5] J. Böcker, Leistungselektronik, Power Electronics, Vorlesungsskript, 2019. Adresse: [https://ei.uni-paderborn.de/fileadmin-eim/elektrotechnik/fg/lea/Lehre/LE/Dokumente/Skript\\_LE\\_SS2019\\_bilingual\\_2019-07-08.pdf](https://ei.uni-paderborn.de/fileadmin-eim/elektrotechnik/fg/lea/Lehre/LE/Dokumente/Skript_LE_SS2019_bilingual_2019-07-08.pdf), [abgerufen am: 14.5.2025]
- [6] J. Hirtel, Entwurf einer Kaskadenregelung für parallel geschaltete Zweiquadrantensteller, Bachelorarbeit, OTH Amberg-Weiden, 2025

## KONTAKT



**Anton Braumüller, B.Eng.**

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



**Jannik Hittel, B.Eng.**

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



**Jan Herold, M.Sc.**

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

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



**Dominik Großmann, M.Sc.**

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

[d.grossmann@oth-aw.de](mailto:d.grossmann@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](mailto:h.zatocil@oth-aw.de)

# Biofilter: Intelligente Feuchtemessung in Hackschnitzelschüttungen für die Abgasreinigung

## Zusammenfassung

Die Biofiltration gilt als etabliertes, umweltfreundliches und kostengünstiges Verfahren der Abluftreinigung. Mikroorganismen bauen flüchtige organische Verbindungen idealerweise zu Kohlendioxid und Wasser ab. Trocknet der Biofilter aus, gelangen schädliche und übel riechende Stoffe in die Umgebung. Die gleichmäßige Befeuchtung des viele Quadratmeter großen Filterkörpers löst das Problem, doch ist der richtige Wassereintrag alles andere als einfach. Eine technische Lösung bietet dieses Projekt.

## Abstract

Biofiltration is an established method of exhaust air purification that is environmentally friendly and cost-effective. Ideally, microorganisms break down volatile organic compounds into carbon dioxide and water. However, if the biofilter dries out, harmful and foul-smelling substances are released into the environment. The problem can be solved by uniformly humidifying the filter body, which covers many square metres, but getting the water input right is anything but easy. This project offers a technical solution.

## Einleitung

Abgase aus Futtertrocknungsanlagen, Kompostwerken, Kläranlagen, Lackierereien, Druckereien, Gießereien und der Tierkörperverwertung durchlaufen in der Regel bis zu 1200 m<sup>2</sup> große Biofilter, um Anwohner vor übel riechenden Geruchseinträgen zu schützen (Abbildung 1). Eine mehrere Meter dicke Schüttung aus natürlichen Absorbiermaterialien, zum Beispiel Holzhackschnitzel, nimmt unerwünschte Geruchskomponenten auf. Trocknet das Filtermaterial aus, passiert der Abgasstrom ohne Reinigung in die Umgebung. Bisher gibt es keine überzeugende technische Lösung, um große Biofilter gleichmäßig feucht zu halten. Typischerweise sucht sich die von unten eingeblasene, heiße Abluft durch einzelne, trocken gelaufene Kanäle und Umwege im Material einen Weg ins Freie, während intakte Regionen im Filter wirkungslos bleiben.

Das Forschungsprojekt verfolgt die Entwicklung eines integrierten Sensorsystems zur Überwachung des Feuchtegehalts in Biofiltern und eine bedarfsorientiert intelligente Ansteuerung der Flüssigkeitszuführung.

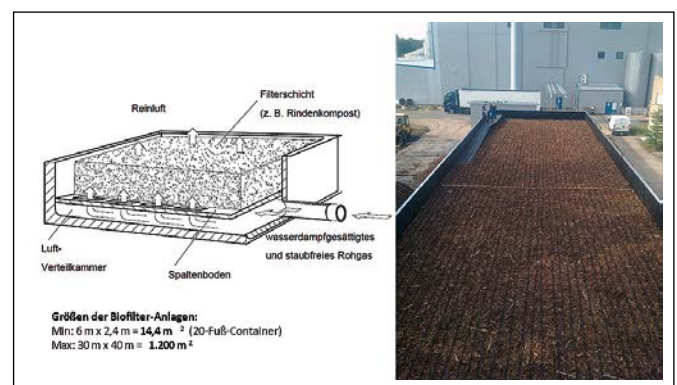


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Biofilters (links) und Ausführungsform einer großflächigen Biofilteranlage zur Abluftreinigung (rechts).

## Spektroskopie mit Funkwellen

Die etablierten Methoden zur Feuchtemessung stoßen in der korrosiven Atmosphäre in realen Biofiltern an ihre Grenzen. Gesucht ist ein robustes Verfahren, das die unregelmäßige Materialverteilung, variierende Korngrößen, Verdichtungen und die feuchtabhängige Eindringtiefe des Messsignals beherrscht. Angesichts des immen-

sen Verdrahtungsaufwands herkömmlicher Verfahren wurden drahtlos übertragbare Wellenlängen im Bereich handelsüblicher WiFi-Kommunikation erprobt. Die frequenzabhängige Dämpfung des Mikrowellen-Funksignals zwischen einem Sender und einem Empfänger erfasst indirekt die Feuchteverteilung in der Schüttschicht. Die verteilte Messung über mehrere Sensorknoten hinweg umgeht aufwändige invasive Sonden und mechanisch empfindliche Messaufbauten.

Wasser absorbiert im Frequenzbereich zwischen 10 GHz und 18 GHz bei 0 °C bis 20 °C am besten. Im Haushaltsbereich gelten 2,45 GHz (0,125 m) als Kompromiss zwischen Signalabsorption und Eindringtiefe. Der Versuchsaufbau im Labor besteht aus einem 65 cm langen, mit feuchtem Biofiltermaterial gefüllten PVC-Rohr, an dessen gegenüberliegenden Enden sich je eine Antenne und die zugehörige Elektronik befinden. Die Sensoren kommunizieren über eine festgelegte Zeit kontinuierlich miteinander; bei jedem erfolgreichen Empfang wird die Signalstärke des eingehenden Funksignals in Dezibel bezogen auf 1 Milliwatt (dBm) aufgezeichnet. Der tatsächliche Trocknungsgrad des Füllmaterials wurde täglich bestimmt, indem das gesamte Messrohr, ohne die Lage des Inhalts zu verändern oder zu vermischen, bei 65 °C für 24 Stunden im Trockenschrank ausgelagert wurde. Über einen Zeitraum von zwölf aufeinanderfolgenden Tagen entstand eine Messsignal-Feuchte-Kurve (Abbildung 2). Mit zunehmendem Trocknungsgrad der feuchten Biomasse wächst die Signalstärke (RSSI) beim Empfänger grob linear. Je feuchter das Material ist, desto stärker wird das Funksignal abgeschwächt.

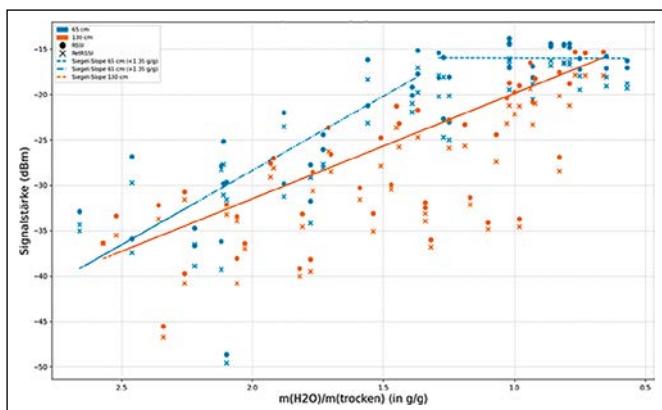


Abbildung 2: Korrelation der Signalstärke (Received Signal Strength Indicator, RSSI, ● Senderichtung, × Empfangsrichtung) bei 2,4 GHz in dBm mit der Feuchte des Biofiltermaterial RIM 220. Wegstrecke: 65 cm (blau) und 130 cm (orange) zwischen Sender und Empfänger durch die Biomaterialschüttung.

Der Signalweg durch die Schüttschicht geht in das Messergebnis ein und muss im späteren Messsystem fixiert werden. Auf kurze Distanz tritt im trockenen Material keine merkliche Signaländerung auf, so dass die Empfindlichkeit der Methode grob  $\pm 5$  dBm beträgt. In diesem Rahmen liegt ungefähr auch die Streuung der Messwerte. Auf größere Entfernung der Sensoren wächst

die Dämpfung des Signals, doch haben sich 5 m Abstand zwischen Sender und Empfänger im realen Biofilter als günstig herausgestellt. Dies stützt die Erwartung, dass die Feuchtigkeit im Material zu einer messbaren Dämpfung des Funksignals führt. Analog zur optischen Spektroskopie und Röntgendurchstrahlungsmessung ist von einem exponentiellen Gesetz für die Signalleistung  $P$  auszugehen, dessen logarithmierte Größe  $A$  mit der Dichte (Wassergehalt  $w$ ) und Schichtdicke  $d$  linear korreliert.

$$A = -\lg \frac{P}{P_0} = \text{konst} \cdot w(\text{H}_2\text{O}) \cdot d$$

### Funktionsnachweis im Feldversuch

Verschiedene Antennenvarianten, darunter Richtantennen mit hoher Verstärkung, wurden in einer technischen Biofilteranlage positioniert (Abbildung 3). Während für 2,4 GHz über Luft bei einem Abstand von einem Meter nahezu keine Signalabschwächung auftrat (0 bis  $-2$  dBm), zeigte sich im eingegrabenen Zustand kein Empfang. Die weitere Entwicklung musste also auf niedrigere Frequenzen ausweichen, die tiefer ins Material eindringen: 433 MHz und 868 MHz werden im LoRa-Funkstandard (Long Range) verwendet werden. Von den eingegrabenen Patch-, T-, Dipol- und Helixantennen zeigten ausschließlich die Stabantennen reproduzierbare Messergebnisse, weil sie sich im Schüttmaterial exakt positionieren und ausrichten ließen. Beim Reichweitentest durch das feuchte Filtermaterial am Standort Gunzenhausen zeigte die 433-MHz-Senderantenne brauchbare Signalstärken, die über Abstände von 0,5 m bis 20 m exponentiell abnimmt. Innerhalb eines Arbeitsbereiches von 1 m treten keine oder wenig Paketverluste auf. Oberhalb von fünf Metern verschwindet das Messsignal in einem mehr oder minder konstanten Grundrauschen ( $-100$  dBm).



Abbildung 3: Feldversuch zur Reichweitenmessung am Biofilterstandort Backnang unter realen Einsatzbedingungen im offenen Biofiltermaterial. Oben rechts: Richtantennen mit hoher Verstärkung.

## Prototyp des Sensornetzwerks

Das Messsystem basiert auf einem Peer-to-Peer-Netzwerk, in dem mehrere Knoten in definierten Abständen im Biofiltermaterial miteinander kommunizieren, kontinuierlich Signalstärken erfassen und in einer zentralen Datenbank ablegen (Abbildung 4). Jeder Knoten besteht aus einer Antenne und der zugehörigen Elektronik zum Senden und Empfangen von Funksignalen. In der hexagonalen Anordnung beträgt der Abstand 1 m von den sechs äußeren Knoten zum zentralen Knoten. Diese Geometrie gleich langer Verbindungsstrecken ermöglicht eine reproduzierbare, feste Positionierung der Antennen im Messmedium. Die Halterung besteht aus Kunststoff, da nasse Hackschnitzel und abgasführende Luft im Biofilter eine chemisch und mikrobiologisch aggressive Umgebung darstellen.

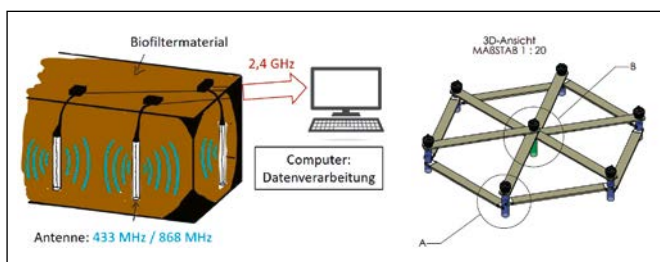


Abbildung 4: *Links:* Schematischer Messaufbau im Biofilter: Funkbasierte Feuchteerfassung über die Signaldämpfung. *Rechts:* Mechanische Halterung für die Sensoranordnung: A) Knoten, B) Sammelknoten.

Das kabelgebundene Messsystem im Laboraufbau besteht aus sieben Knoten, die mit einer Versorgungsspannung von 12 V betrieben werden und über eine zweidrahtige RS-485-Leitung nach dem Modbus-Protokoll kommunizieren. Jeder Knoten reagiert dabei auf Abfragen eines zur Systemsteuerung eingesetzten Computers (Master) und übermittelt Messdaten an diesen zurück.

Zur Datenübertragung über größere Distanzen ist in jedem Knoten ein Mikrocontroller vom Typ ESP32 verbaut, der einen LoRa-Transceiver (SX1262) mit einer 433-MHz-Antenne ansteuert. Diese Einheit dient dem kontinuierlichen bidirektionalen Funkdatenaustausch.

Die Steuerung und das Auslesen der Knoten erfolgen gezielt über die RS-485-Modbus-Datenleitung. Ein zentrales Gateway übernimmt die Koordination der Messlogik, erkennt die verfügbaren Knoten, organisiert die Messreihenfolge und sammelt die erfassten Daten zentral. Speicherung, Analyse, Verarbeitung und Visualisierung der Daten erfolgen anschließend auf einem angebotenen Computer.

## Ausblick

Weil sich die Betriebsbedingungen technischer Biofilter im Labor nur eingeschränkt nachbilden lassen, sind zum weiteren Projektfortschritt Messungen im Realbetrieb erforderlich, zum Beispiel beim Zweckverband Müllverwertung Schwandorf (ZMS). Mit geeigneten Antennentypen und robuster Sendelektrotronik gilt es den relevanten Messbereich festzulegen, der die kritischen Feuchtezustände der Anlage bestmöglich abbildet. Die Kalibrierung des Messsystems im Feuchtebereich von 40 % bis 70 % (4 bis 7 g/g) im halbertechnischen Maßstab soll planmäßig an einer Pilotanlage der Störk GmbH erfolgen.

Für den technisch wenig versierten Anlagenbenutzer visualisiert das Messsystem die Echtzeitdaten aus den Sensorknoten in einer Anzeige, die die Zonen des Biofilters als Farbfelder anzeigt, um Feuchtetrends im Filtermaterial zu identifizieren. Färbt sich der grüne Grundton für gute Befeuchtung nach Rot, setzt eine automatische Befeuchtung des Filters an den kritischen Stellen ein. Über numerische Verfahren der Datenauswertung, z. B. ein PredictiveMaintenance-Verfahren und Machine-Learning, sollen rechtzeitige Vorhersagen für kritische Zustände getroffen werden. Für den Einsatz unter realen Bedingungen – im Hinblick auf die Robustheit und Zuverlässigkeit des dualen Funkkommunikationssystems – ist noch weitere Entwicklungsarbeit nötig. Auf ein funktionierendes Sensorsystem setzt abschließend die Erprobung intelligenter Strategien zur gezielten Bewässerung und zustandsbasierten Wartung von Biofiltern auf.

---

**Projektpartner:**

Störk Umwelttechnik GmbH, 78576 Emmingen

**Fördergeber:**

Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

**KONTAKT**

**Stefan Wiendl, M.Eng.**

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

s.wiendl@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



**Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberg**

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

c.lindenberg@oth-aw.de

## Sensorarrays: Ein visionärer Weg zur elektrochemischen Zunge

### Zusammenfassung

Die „elektronische Zunge“ ist ein elektrochemisches Sensorsystem, das der Funktion des menschlichen Geschmackssinns nachempfunden ist und präzise Flüssigkeitsproben analysieren kann. In diesem Beitrag wird ein potentiometrisches Sensorarray mit zwölf Metallelektroden vorgestellt, das mittels eines selbst entwickelten Messverfahrens die Potentialdifferenzen der Elektroden aufzeichnet. Die Darstellung und Verarbeitung der 132 Messwerte, die das Sensorfeld in Echtzeit liefert, wird detailliert beschrieben. Mittels Hauptkomponentenanalyse konnten Getränkeproben grob in die Kategorien Wasser, Limonade, Fruchtsäfte, Bier und Kaffee eingeordnet werden.

### Abstract

The electronic tongue is an electrochemical sensor system modeled after the human sense of taste, capable of precise analysis of liquid samples. This article presents a potentiometric sensor array with twelve different metal electrodes, which records the potential differences of the electrodes using a self-developed measurement concept. The illustration and processing of the 132 array measurement values the array delivers in real time are described in detail. By the help of principal component analysis, different beverage samples were roughly categorized into water, lemonade, fruit juices, beer, and coffee.

### Der menschliche Geschmackssinn

Der Geschmack ist einer der wichtigsten Sinneseindrücke des Menschen. Die Geschmacksknospen im Mundraum und auf der Zunge nehmen die chemische Zusammensetzung von Lebensmitteln und Getränken nach Nährstoffgehalt, Schmackhaftigkeit und potenzieller Toxizität wahr und schützen so den Menschen vor gefährlichen oder negativen Einflüssen aus der Umwelt. Die Lebensmittelchemie unterscheidet fünf Geschmacksrichtungen: salzig, süß, bitter, sauer und umami [1].

Eine Geschmacksknospe besteht aus 50 bis 100 Zellen. Nach dem Grundprinzip in Abbildung 1 gibt es drei Haupttypen: Typ-1-Zellen sind ähnlich zu den Gliazellen des Nervensystems und machen etwa 50 % der Geschmackszellen aus. Sie detektieren den salzigen Geschmack und entfernen überschüssige Neurotransmitter, ATP und Kaliumionen aus der Umgebung. Typ-2-Zellen, etwa ein Drittel der Geschmackszellen, sind hochspezialisiert und

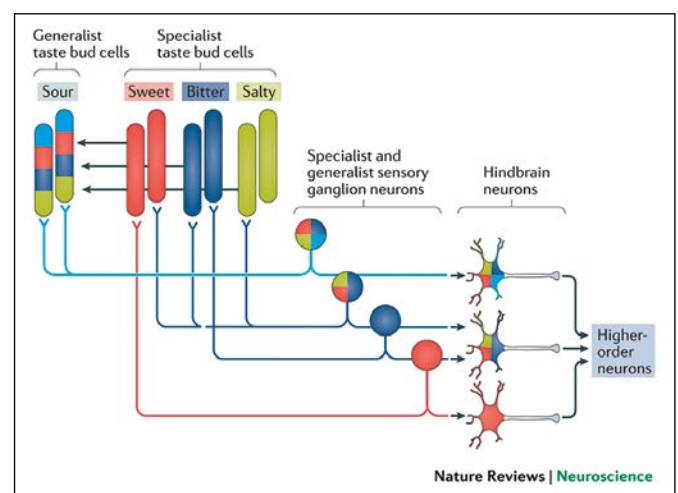


Abbildung 1: Verallgemeinertes Prinzip des menschlichen Geschmackssinns [1].

reagieren auf Zucker, Aminosäuren und Bitterstoffe. Somit sind sie die Sensoren für die Geschmacksrichtungen süß, bitter und umami. Typ-3-Zellen reagieren auf

sauren Geschmack und zusätzlich auf die Zell-zu-Zell-Kommunikation innerhalb der Geschmacksknospe. Je nach Ort der Mundschleimhaut bilden sie 2 % bis 20 % der Geschmackszellen. Die verknüpfenden Ganglienneuronen verarbeiten die Signale einer Geschmacksrichtung oder fassen verschiedene Reize zusammen und leiten sie zu den Neuronen des Hinterhirns weiter. Daraus entsteht der verarbeitete Geschmackseindruck aller gesammelten Signale im neuronalen Netz des Gehirns [1].

## Die elektronische Zunge

Nach Vorbild des menschlichen Geschmackssinns wurde Ende der 1980er Jahre die Idee der elektronischen Zunge ersonnen. Nach dem IUPAC Technical Report 2005 ist die elektronische Zunge ein analytisches Instrument, das ein Messfeld aus nicht selektiven, chemischen Sensoren mit partieller Spezifität gegenüber verschiedenen Lösungskomponenten sowie ein Mustererkennungsverfahren oder multivariate Kalibrationsalgorithmen zur Datenverarbeitung (z. B. Hauptkomponentenanalyse, künstliche neuronale Netze, Partial Least Squares Regression) umfasst.

Am ehesten anschaulich sind potentiometrische Arrays mit bewusster Querempfindlichkeit nach der Nikolsky-Eisenman-Gleichung.  $K_{ij}$  ist der Selektivitätskoeffizient für das Ion  $i$  gegen das interferierende Ion  $j$  der Konzentration  $a$  und Ladungszahl  $z$ , die zum gemessenen Elektrodenpotential  $E$  beitragen [2,3].

$$E = E^0 + \frac{RT}{z_j F} \ln \left( a_i + \sum_j K_{ij} (a_j)^{\frac{z_i}{z_j}} \right)$$

Als Sensormaterialien werden vorwiegend Metalloxide, elektrisch leitfähige Polymere oder metallorganische Verbindungen in Verbindung mit einer Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode verwendet. Oft werden die Arbeitselektroden mit einer semipermeablen Membran oder mit Enzymen modifiziert. Anschaulich reagieren die unterschiedlichen Materialien des Arrays unterschiedlich stark auf die in der untersuchten Lösung vorhandenen Ionen und Inhaltsstoffe, so dass ein Muster entsteht, das eine eindeutige Identifikation des Analyten möglich macht, beispielsweise die Unterscheidung von Kaffee von Tee. Derartige intelligente Sensorsysteme sind flexibel einsetzbar, beispielsweise im Gesundheitswesen zur Früherkennung von Infektionskrankheiten wie SARS-CoV-2 durch die Untersuchung des Speichels, in der Produktion und Qualitätssicherung, zur Überprüfung und Identifikation von Getränken und in der Umwelt und Gewässeranalytik, als Frühwarnsystem gegenüber Umweltgiften oder gefährlichen Substanzen [2-5].

Neben der Potentiometrie finden auch andere elektrochemische Messverfahren Anwendung, wie die Voltammetrie, Amperometrie oder Impedanzspektroskopie.

Letztere ist häufig in den nah verwandten Sensorarrays für Gase vertreten, welche als elektronische Nase bezeichnet werden. Verknüpfungen der Untersuchungsmethoden werden als „Data Fusion“ bezeichnet und können spektroskopische Verfahren einbeziehen. So ist es grundsätzlich möglich, durch die Kombination von Ruhepotential und Impedanzspektroskopie mit einer Anordnung aus einem Platindraht und einem Nickeldraht die fünf Geschmacksrichtungen effektiv zu unterscheiden [2,4,6,7].

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Messung, Datenverarbeitung und Auswertung potentiometrischer elektronischer Zungen mit bis zu zwölf Elektroden vorgestellt.

## Das Messverfahren

Die zentrale Einheit zur Speicherung, Erfassung und Verarbeitung der Daten stellt ein Raspberry Pi 3 dar. An diesen wurden vier Analog-Digital-Wandler (ADS1115) über den I<sup>2</sup>C-Bus angeschlossen (Abbildung 2). Die vier Messkanäle mit Differentialmodus vergleichen die Potentiale. Die Messverstärkung wird über die Software auf den Wert vier eingestellt. Damit kann der 16 Bit AD-Wandler einen Spannungsbereich von  $\pm 1.025$  V messen. Durch den hohen Eingangswiderstand von 2.4 M $\Omega$  können die Elektroden direkt angeschlossen werden, wobei immer drei Kanäle gegen den vierten gemessen werden, was zusammen zwölf parallele Messkanäle für die Arbeitselektroden und einen für die Referenzelektrode ergibt [8,9].

Die Referenzelektrode definiert einen Bezugspunkt in einer elektrochemischen Messung dar. Gegen ihr festes Potential können die gemessenen Potentiale der Arbeitselektrode in Standardpotentiale umgerechnet werden [10]. Beschränkt man sich beim potentiometrischen Array auf die Mustererkennung, ist die exakte Messung gegen standardisierte Potentiale nicht zwingend erforderlich. Jede Arbeitselektrode eines 12 Elektroden-Arrays kann durch geeignete Verschaltung als Pseudoreferenzelektrode fungieren. Dies wurde mittels 12 Printrelais realisiert,

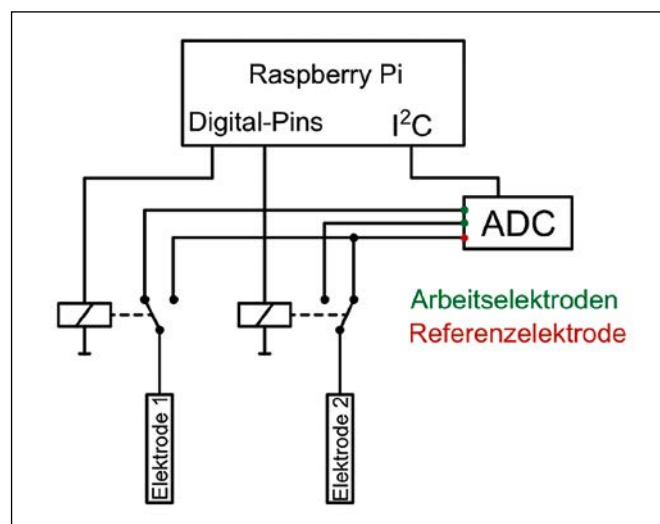


Abbildung 2: Messprinzip des elektrochemischen Sensorarrays.

welche durch die digitalen Ausgänge des Raspberry Pis gesteuert werden können.

Bei der Messung wird jeweils eine Arbeitselektrode auf den vierten Eingang des AD-Wandlers gelegt und die restlichen Elektroden nacheinander gegen diese im Differentialmodus gemessen. Durch kontinuierlichen Wechsel werden alle Elektroden gegeneinander vermessen. Daraus ergeben sich je Durchlauf aus 11 Elektroden · 12 Schritte = 132 Messwerte. Jede Ruhepotential-Messung zeigt ein typisches Einschwingverhalten (Abbildung 3). Nach 120 Sekunden stellt sich ein stabiles Potential ein. Als Endwert wird der Median der letzten 60 Werte festgelegt, welcher für die Kalibration und Probenmessung herangezogen wird.

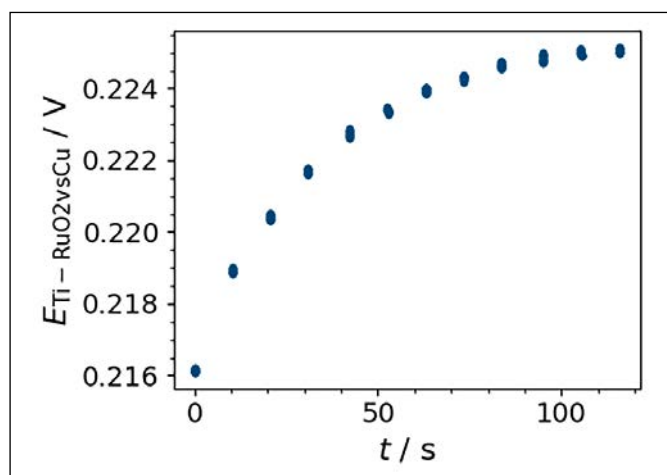


Abbildung 3: Beispielhafter Potentialverlauf einer RuO<sub>2</sub>/Ti-Elektrode gegen einen Kupferdraht im 12-Elektrodenarray. Messzeit: 120 sec.

### Visualisierung des Geschmackseindrucks

In Abbildung 4 sind die Messwerte eines 12-Elektroden-Arrays, bestehend aus zwölf Drähten aus Metallen, Metalloxiden und Glaskohlenstoff beispielhaft dargestellt: in Matrixform (Abbildung 4a) und als Spektrum (Abbildung 4b).

Haben zwei Proben einen deutlichen Potentialunterschied, so ist das in der Matrixform sofort zu erkennen, zum Beispiel zwischen Leitungswasser mit Bier. Kleine Potentialdifferenzen tragen geringe Farbunterschiede, zum Beispiel Leitungswasser und Apfelschorle. Hier ist die Spektrendarstellung besser geeignet.

Bei näherer Betrachtung der Matrixdarstellung fällt auf, dass es sich um eine schiefsymmetrische Matrix handelt. Das heißt, dass die Werte in der rechten oberen Dreiecksmatrix, gespiegelt an der Hauptdiagonalen, die negativen Werte der linken unteren Dreiecksmatrix sind. Dies ist nachvollziehbar, da bei der Messung die Kombination der Elektroden gedreht wird, was zu einer Redundanz

führt und für Fehlererkennung und -korrektur verwendet werden kann. Die Hauptdiagonale bleibt leer und wird nicht in die Daten einbezogen, da eine Messung derselben Elektrode als Arbeits- und Referenzelektrode immer 0 V anzeigt.

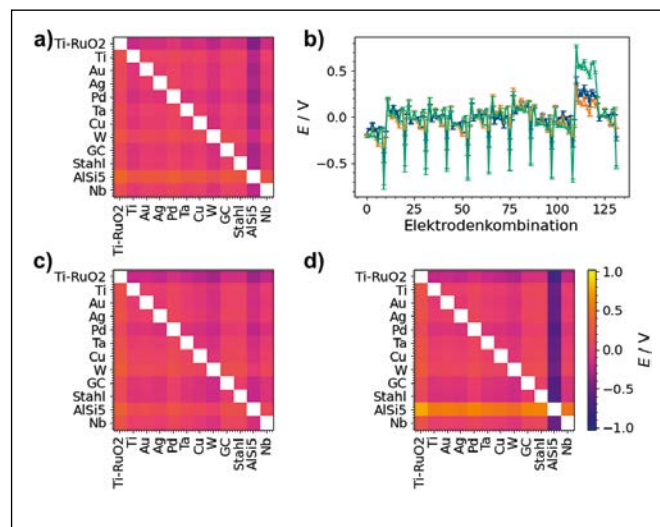


Abbildung 4: Messwerte des 12-Elektroden-Sensorarray: **a)** Matrixdarstellung der Ruhepotentialdifferenzen für Amberger Leitungswasser, **c)** für Apfelschorle, **d)** für Helles Bier, **b)** Spektrumdarstellung der Elektrodenpotentiale über die Nummer der jeweiligen Elektrodenkombination. Blau: Leitungswasser, orange: Apfelschorle, grün: Helles Bier.

### Numerisches Geschmacksmodell

Im Folgenden soll ein „Geschmacksmodell“ anhand verschiedener Getränkeproben demonstriert werden. Dafür wurden 16 Getränke, welche grob in Wasser, Limonade, Saft/Saftschorle, Bier und Kaffee kategorisiert wurden, an drei verschiedenen Tagen in insgesamt sechs Durchläufen mit dem 12-Elektroden Drahtarray vermessen. Als Ruhepotentialdifferenz werden immer die Mediane der letzten 60 Werte einer 120-Sekunden-Messung verwendet. Daraus resultieren 5760 Matrizen, wodurch die bildliche Darstellung und das manuelle Vergleichen schnell an Grenzen stößt. Abhilfe bieten Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens oder der künstlichen Intelligenz wie beispielsweise die Hauptkomponentenanalyse. Dieses statistische Verfahren reduziert die Zahl der abhängigen Variablen (Dimensionen) durch Projektion des ursprünglichen Koordinatensystems in die Richtung der maximalen Varianz der Messdaten und deren Orthogonalen [11,12].

In Abbildung 5a sind die ersten drei Hauptkomponenten des Datensatzes der Getränkeproben dargestellt. Diese beinhalten 91,08 % der gesamten Varianz (PC0: 78.74 %, PC1: 8.18 % und PC2: 4.16 %). In Abbildung 5b sind die Werte der Ladungsmatrix – die Werte zur Berechnung der ersten Hauptkomponente – dargestellt. Dabei wird deutlich, dass wesentlich die Messungen dem Aluminium-Silicium-Draht einfließen. Bei Drehung des dreidimensiona-

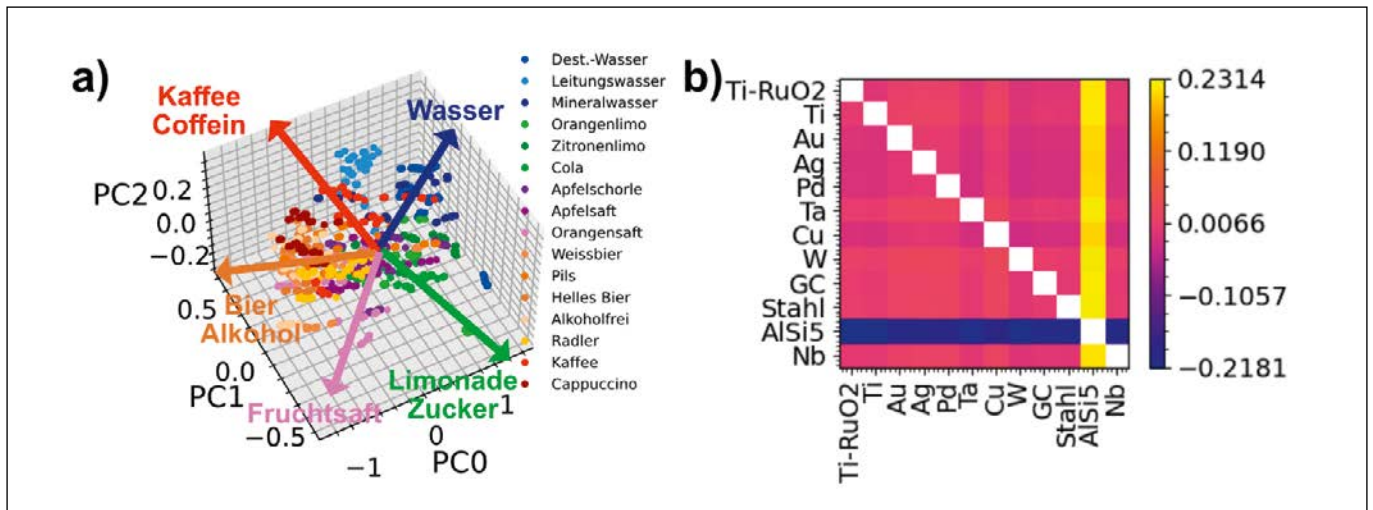


Abbildung 5: Numerische Auswertung von Geschmackseindrücken aus dem 12-Elektroden-Sensorarray: **a)** Hauptkomponentenanalyse der 132 Spannungsmesswerte. Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten mit PC0: 78.74 %, PC1: 8.18 % und PC2: 4.16 % der Datenvarianz, was zusammen 91.08 % ergibt. **b)** Ladungen der ersten Hauptkomponente in der Matrixform.

len Systems in Abbildung 5a sind Richtungen zu erkennen, in denen sich fünf Getränkearten anordnen. Verallgemeinert könnte man von einer Wasser-, Zucker-, Alkohol- und Coffein-Richtung sprechen. Limonade bildet die „Zucker-Achse“, gegenüber liegen die ungesüßten coffeinhaltigen Getränke. Biere weisen in Richtung der alkoholhaltigen Getränke, wobei Radler ebenfalls einen Trend zum Zucker zeigt. Fruchtsäfte liegen je nach Fruchtgehalt zwischen zuckerhaltigen und alkoholhaltigen Getränken. Die so strukturierten Daten könnten durch weiterführende Algorithmen des maschinellen Lernens wie Random Forests, Nearest Neighbors oder künstliche neuronale Netze verarbeitet und für präzise Vorhersagen des vorliegenden Getränks verwendet werden.

### Ausblick

Elektronische Zungen sind eine vielversprechende Neuerung in der elektrochemischen Sensorik, deren Grundprinzip den menschlichen Geschmackssinn nachempfunden ist. Die Kombination verschiedener Messmethoden und Elektroden durch modernes maschinelles Lernen erlaubt es, die Daten in einen anschaulichen Zusammenhang zu bringen. Das erlaubt die Klassifikation ähnlich dem Schmecken oder auch die quantitative Analyse bestimmter Substanzen.

Das vorgestellte Konzept für ein potentiometrisches 12-Elektroden-Array umfasst die Messtechnik, Datenerfassung, bildliche Darstellung und Verarbeitung. Durch eine Hauptkomponentenanalyse konnten 16 verschiedene Getränkeproben in die Kategorien Wasser, Limonaden, Fruchtsäfte, Biere und Kaffee getrennt werden.

## Referenzen:

- [1] S.D. Roper, N. Chaudhari, Taste buds: cells, signals and synapses, *Nat. Rev. Neurosci* 18 (2017) 485-497.
- [2] Yu. Vlasov, A. Legin, A. Rudnitskaya, C.D. Natale, A. D'Amico, Nonspecific Sensor Arrays ("Electronic Tongue") for Chemical Analysis of Liquids: (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.* 77 (2005) 1965-1983.
- [3] Y. Vlasov, A. Legin, Non-selective chemical sensors in analytical chemistry: from "electronic nose" to "electronic tongue", *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 361 (1998) 255-260.
- [4] D. Tibaduiza, M. Anaya, J. Gómez, J. Sarmiento, M. Perez, C. Lara, J. Ruiz, N. Osorio, K. Rodriguez, I. Hernandez, C. Sanchez, *Electronic Tongues and Noses: A General Overview*, *Biosensors* 14 (2024) 190.
- [5] M. Falk, C. Psotta, S. Cirovic, L. Ohlsson, S. Shleev, *Electronic Tongue for Direct Assessment for SARS-CoV-2-Free and Infected Human Saliva – A Feasibility Study*, *Biosensors* 13 (2023) 717.
- [6] F. Winqvist, P. Wide, I. Lundström, *An electronic tongue based on voltammetry*, *Analytica Chimica Acta* 357 (1997) 21-31.
- [7] S. Yadav, R.G. Pala, *Taste Classification by Data Fusion at a Single-Channel Hybrid Potentiometric and Impedimetric Electronic Tongue*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (2025) 1-8.
- [8] Raspberry Pi Ltd, "Raspberry Pi 3 Model B+", *Datenblatt*, Jan. 2025.
- [9] Texas Instruments, "ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator", *Datenblatt*, 2024.
- [10] P. Kurzweil, *Angewandte Elektrochemie: Grundlagen, Messtechnik, Elektroanalytik, Energiewandlung, technische Verfahren*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2025.
- [11] N. Zell, I. Jakobi, E. Bisse, J. Schottenbauer, Ch. Schell, P. Kurzweil, *Hauptkomponentenanalyse: Eine analytische Bierprobe*, *Forschungsbericht 2021*, OTH Amberg-Weiden.
- [12] P. Geladi, B.R. Kowalski, *Partial least-squares regression: a tutorial*, *Analytica Chimica Acta* 185 (1986) 1-17.

## 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



**Christof Dinkelbach, M.Eng.**

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

c.dinkelbach@oth-aw.de



**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

## Iridium dioxide as a voltammetric pH sensor: Influences of acidity, conductivity and electrode age

### Zusammenfassung

Ein neuartiger Ansatz zur pH-Messung mittels Cyclovoltammetrie an Platinmetalloxid-Elektroden wird vorgestellt. Auf dem Weg zu einer Analyseverfahren für den Laborgebrauch wurde ein Experiment mit über 1800 voltammetrischen Zyklen während automatisierter Titrations in Universal-Pufferlösungen bei pH 2 bis pH 12 durchgeführt. Das voltammetrische Peakpotential zeigt den pH-Wert bei kleinem Vorschub am besten an. Die Faraday-Stromdichte ist ein weniger guter pH-Indikator und muss um die aktive Elektrodenoberfläche und Elektrolytleitfähigkeit korrigiert werden. Der Abstand der Stromspitzen des Ir<sup>III</sup>/Ir<sup>IV</sup>-Redoxpaar zeigt den Elektrolytwiderstand an. Anhand unbekannter Proben wurde eine Vierpunktkalibrierung für pH-Wert und Leitfähigkeit validiert und erfolgreich an echten Getränkeproben getestet.

### Abstract

A novel approach to pH measurement using cyclic voltammetry with platinum metal oxide electrodes is demonstrated. On the way to an analytical method for laboratory use, a large-scale experiment with over 1800 voltammetric cycles during automated titrations in universal buffer solutions at pH 2 to pH 12 was conducted. The voltammetric peak potential at slow scan rates best reflects pH changes in the solution. The faradaic peak current density is a less reliable pH indicator and requires correction of the active surface area and solution resistivity. The peak-to-peak separation of the Ir<sup>III</sup>/Ir<sup>IV</sup> redox peak was found to be indicative of the uncompensated electrolyte resistance. For unknown samples, a four-point calibration for pH and conductivity was validated and successfully tested on real beverage samples.

### Introduction

Iridium dioxide (IrO<sub>2</sub>) is known for its exceptional stability and well-defined pH-dependent redox behaviour [1, 2]. It remains unaffected by most ions in aqueous solutions and can operate over a wide temperature range. To date, research on metal oxide pH sensors has mainly focused on potentiometry, i.e. the measurement of the equilibrium potential of selected redox-active species in the electrode/electrolyte system.

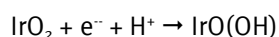
This paper outlines a new approach using cyclic voltammetry (CV) and demonstrates that the redox chemistry of hydrous IrO<sub>2</sub> is highly pH sensitive. However, the voltammogram must be carefully corrected for electrode ageing and changes in electrolyte conductivity. We propose a practical procedure for evaluating cyclic voltammograms, opening up an electroanalytical method for the simulta-

neous measurement of pH and conductance in technical media.

An IrO<sub>2</sub> working electrode (1 cm<sup>2</sup>) was prepared by droplet coating of a precursor solution (125 mg of IrCl<sub>3</sub> in 20 mL acetone and 5 mL 1-molar HCl) onto a cleaned titanium foil, followed by thermal oxidation in air (at 500 °C for 2 h). The electrode was then measured against an Ag|Ag-Cl|KCl reference electrode and a platinum sheet counter electrode in a Britton-Robinson buffer solution containing citric acid 16.020 g/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 10.374 g/L, TRIS 9.236 g/L, boric acid 4.714 g/L, glycine 5.722 g/L, and HCl (32 %) 9.84 mL/L. This solution was diluted or titrated with NaOH solution (1 mol/L) to achieve specific pH values ranging from pH 2.3 to pH 12.

The cyclic voltammogram in Figure 1 distinguishes four regions of electrode processes: the hydrogen sorption,

the double layer region around the potential of zero-charge, the Ir<sup>III</sup>/Ir<sup>IV</sup> redox reaction around the open-circuit potential; and the region where higher oxides are formed and the oxygen evolution occurs. While all signals demonstrate some degree of useful pH dependence, the redox reaction around 0.67 V vs. Ag|AgCl|KCl (0.86 V NHE) is the most useful for voltammetric pH measurements. The redox potential follows the Nernst equation.



$$E = E^0 + \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{a(\text{Ir}^{\text{IV}}) \cdot a(\text{H}^+)}{a(\text{Ir}^{\text{III}})} \right) \approx E^0 - S \cdot \text{pH}$$

The Nernst slope of the used IrO<sub>2</sub>/Ti electrode is often referred to as pH sensitivity.  $S = |dE/d\text{pH}| = 63.8$  mV was obtained from the electrolyte resistance-corrected half-wave potential of the Ir<sup>III</sup>/Ir<sup>IV</sup> peak in various pH buffer solutions at different scan rates ( $R^2$ : 0.994). The measured sensitivity is slightly above the expected Nernstian slope of 59.16 mV/pH at 25 °C. Hydrous Ir<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · x H<sub>2</sub>O films show a response close to 90 mV/pH, whereas the more stable anhydrous coatings resulting from the thermal decomposition of iridium chloride, as used in this study, produce values around 60 mV/pH.

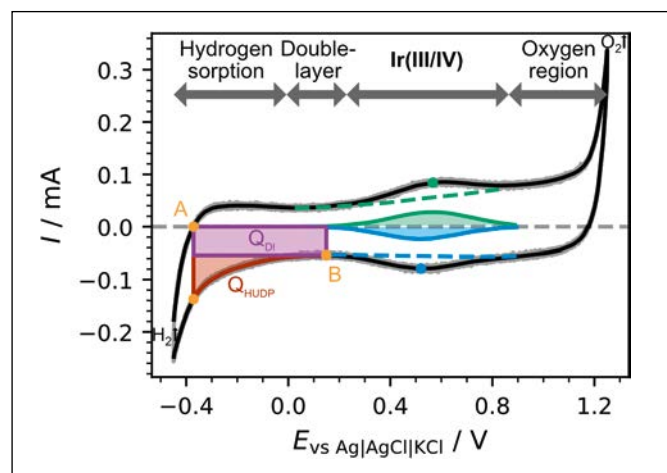


Figure 1: Cyclic voltammogram of an IrO<sub>2</sub>/Ti electrode against a silver-silver chloride reference and a platinum counter electrode in a universal buffer solution (pH 2.35, conductivity 14.58 mS/cm, scan rate 0.1 V/s). Dashed line: capacitive current. Q: electric charge of hydrogen underpotential deposition (HUDP) and double layer (DL). A and B: integration limits.

### Numerical evaluation of cyclic voltammetry data

We propose a generalized, computer-based, numerical evaluation procedure for cyclic voltammetry, which uses the PYTHON [3] packages NUMPY, SCIPY, PYGMO and STATSMODELS. By approximating the voltammetric redox peaks of iridium dioxide with Gaussian distributions, we have found that the second derivative of the cyclic voltammogram most effectively removes the capacitive baseline.

**1<sup>st</sup> step:** The *electrochemically active electrode surface area* (ESCA) is found in the region of cathodic hydrogen underpotential deposition below 0 V vs. Ag|AgCl in 0.5 molar sulfuric acid or universal buffer solution (pH 2.3), at a scan rate of  $v = 0.1$  V/s. Using the trapezoidal rule, the current between the points A and B in Figure 1 is integrated. Subtracting the double-layer charge  $Q_{DL}$  from the total electric charge  $Q_{AB}$  gives the hydrogen adsorption charge  $Q_{HUDP}$ , which is then divided by the reference value of smooth iridium ( $179 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ) [4, 5].

$$Q = \int I dt = \frac{1}{v} \int_{(A)}^{(B)} I(E) dE$$

$$A = \frac{Q_{AB} - Q_{DL}}{179 \mu\text{C cm}^{-2}}$$

According to step 1, the active electrode surface area (ESCA) deteriorates from  $A = 0.560 \pm 0.043$  cm<sup>2</sup> at the beginning of the long-term experiment to  $0.283 \pm 0.014$  cm<sup>2</sup> by the end. This indicates a loss of material and blocking of the active sites, affecting the capacitive and faradaic currents. The logarithmic current density,  $j = I/A$ , which is calculated by dividing the electric current by the ESCA, shows a linear trend with pH. However, this correlation is noisy ( $R^2$ : 0.20), as the ESCA value was only determined at the start of the titration at low pH values.

**2<sup>nd</sup> step:** The *electrolyte resistance* of the sample solution, which causes the ohmic voltage drop, is determined from the potential difference between the Ir(III) oxidation and the Ir(IV) reduction peaks in the cyclic voltammogram. The derivative of the cyclic voltammogram  $dI/dE$  has the dimension of a conductance. To obtain the ohmic resistance of the cell from a cyclic voltammogram, the peak-to-peak separation was measured at a fast scan rate of 1 V/s, where cell impedance is mainly determined by the double-layer capacitance and the solution resistance. Note that  $I_{P,red}$  has a negative sign.

$$\Delta E_P = E_{P,Red} - E_{P,Ox}$$

$$R_e = \frac{\Delta E_P + 2.218 \cdot RT/F}{I_{P,Red} - I_{P,Ox}}$$

During the long-term experiment, the voltammetric areal cell resistances  $A \cdot R_e$  (in  $\Omega \text{ cm}^2$ ) and the solution resistivities showed a good correlation ( $R^2$ : 0.962). However, as cyclic voltammetry is measured in a three-electrode configuration and the electrolyte resistivity  $\rho$  (in  $\Omega \text{ cm}$ ) is obtained using an AC method with a planar double-plate cell, a constant offset is observed between the two quantities.

**3<sup>rd</sup> step:** The *half-wave potential* of the Ir<sup>III</sup>/Ir<sup>IV</sup> redox reaction was measured at a moderate scan rate of 0.1 V/s

in the sample electrolyte and calculated as the average of the oxidation and reduction peak potentials. Figure 2 illustrates the impact of solution conductivity on the cyclic voltammogram. In highly conductive electrolytes, the redox peaks exhibit the theoretical peak distance of 57 mV. In poorly conducting electrolytes, however, the peak potential increases at fast scan rates due to the ohmic drop. The redox potential corrected for electrolyte resistance is:

$$E_{1/2} = \frac{E_{P,Ox} + E_{P,Red}}{2} - \frac{R_e}{2} \cdot (I_{P,Ox} + I_{P,Red})$$

**4<sup>th</sup> step:** The *faradaic current* of the redox reaction is found by subtracting the double-layer charging current from the peak current. The double-layer currents and faradaic currents of adsorbed species depend linearly on the applied scan rate ( $I_c = C v$ ), whereas diffusion-controlled redox reactions follow the Randles-Sevcik equation ( $I_f \sim v^{1/2}$ ), suggesting a strong correlation between pH and ( $\lg I_f$ ). Assuming a diffusion coefficient of the proton in water of  $D = 7 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  and a scan rate of  $0.1 \text{ V/s}$  at  $25^\circ\text{C}$ , the faradaic current density ranges from  $0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (pH 7) to  $0.7 \text{ A}/\text{cm}^2$  (pH 0).

$$I_P = I_C + I_F$$

$$I_F = 0.4463 \text{ A c} \sqrt{\frac{(zF)^3 D v}{RT}}$$

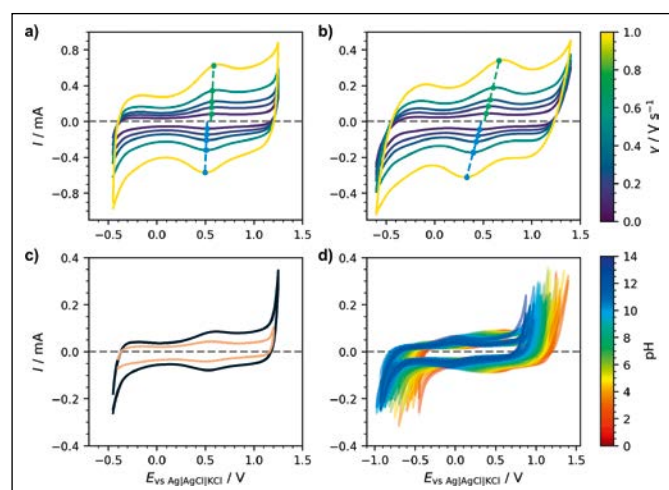


Figure 2: Cyclic voltammograms of an  $\text{IrO}_2/\text{Ti}$  electrode at  $25^\circ\text{C}$ : (a) in a high-conductivity buffer solution at pH 2.35 ( $14.58 \text{ mS}/\text{cm}$ ) at different scan rates, (b) in a low-conductivity buffer (diluted 1:25, pH 2.87,  $1.125 \text{ mS}/\text{cm}$ ). Peak potentials:  $\text{Ir}^{\text{III}}/\text{Ir}^{\text{IV}}$  oxidation (green) and reduction (blue). (c) New electrode (cycle 2) and the aged electrode (cycle 1532, in orange) and (d) shift of cyclic voltammograms with solution pH in high-conductivity buffer.

Figure 3 compiles the correlation coefficients between various voltammetric quantities. There is a strong linear correlation between peak potential difference and scan rate, as well as between the half-wave potential and pH. The voltammetric peak potential at slow scan rates best reflects changes in the solution pH. However, the faradaic

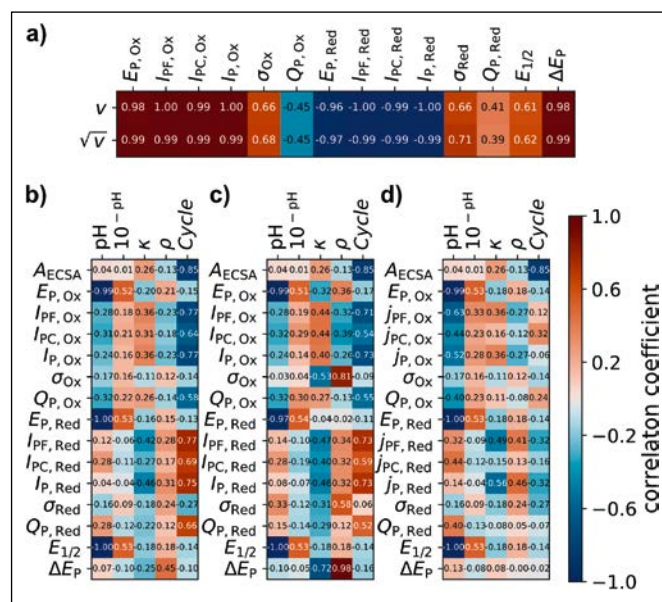


Figure 3: Pearson correlation coefficients for a positive (red) and negative trends (blue) in 1830 cyclic voltammograms of potential  $E$ , current  $I$ , and electric charge  $Q$ , (a) with scan rate  $v$ , (b) with pH, solution conductivity  $\kappa$ , specific resistance  $\rho$ , cycle age at low scan rate of  $0.1 \text{ V/s}$ , (c) at a high scan rate of  $1 \text{ V/s}$ , (d) in the cyclic voltammograms corrected by electrode ageing.

peak current density is a less reliable pH indicator and requires correction for active surface area and solution resistivity.

As the electrode ages, the electric current drops due to the loss of active surface area. For cyclic voltammograms that have been corrected for electrolyte resistance and active electrode surface area, there is no longer any correlation with cycle life, in other words, our correction method successfully removes the effect of ageing from the data.

### Practical voltammetric measurement

To demonstrate the feasibility of the proposed CV method, a four-point-calibration was conducted in universal buffer solutions at pH 3 and 10, each at low and high conductivity, to account for conductivity interference. To minimize outliers, ten cycles were analyzed.

**1<sup>st</sup> step.** The ECSA of the used  $\text{IrO}_2/\text{Ti}$  electrode was determined to be  $A = 1.931 \text{ cm}^2$  from the hydrogen underpotential deposition region ( $0.1 \text{ V/s}$ , pH 3 high conductivity buffer,  $25^\circ\text{C}$ ). The electrode's coating mass was  $0.283 \text{ mg}/\text{cm}^2$ .

**2<sup>nd</sup> step.** The solution resistance was calculated using the  $\text{Ir}(\text{III})/\text{Ir}(\text{IV})$  peak potentials and currents at a high scan rate of  $1 \text{ V/s}$ . Using the specific resistance of the electrolyte (as measured by a conductivity meter) and the ECSA, a linear calibration of the conductivity was obtained:

$$R_e A = 0.8333 \text{ cm} \cdot \rho + 44.9 \Omega \text{ cm}^2$$

**3<sup>rd</sup> step.** The corrected half-wave potential was calculated at a moderate scan rate of 0.1 V/s, which formed the basis for the pH calibration:

$$E_{1/2} = -69.9 \text{ mV} \cdot \text{pH} + 706.8 \text{ mV}.$$

**4<sup>th</sup> step.** After calibration, five CV cycles were recorded with the same electrochemical cell setup at 1 V/s and 0.1 V/s for each beverage sample tested. The resulting Ir(III)/Ir(IV) peak parameters as well as the calculated ohmic resistances and half-wave potentials are compiled in Table 1.

For example, for the unknown sample “apple spritzer”, the CV method at 1 V/s measures a peak-to-peak separation of  $\Delta E = (149.3 - 785.1) \text{ mV}$  and a current difference of  $\Delta I = (-0.953 - 1.112) \text{ mA}$  between reduction and oxidation, leading to  $R_e = 280 \Omega$  (2<sup>nd</sup> step). The measurement at 0.1 V/s then yields a corrected mean potential of  $E_{1/2} = 0.432 \text{ V}$ , and the unknown acidity is found from the calibration line as pH 3.93. In this case, voltammetric pH measurement and pH electrode deliver the same result: pH  $3.9 \pm 0.1$ .

The voltammetric pH and resistivity values show a relatively good agreement with the reference measurements using a glass electrode ( $\pm 3.1\%$ ) and a conductivity meter ( $\pm 11.4\%$ ). Very poor or very high conductivity leads to a larger error in pH and resistivity, because the peak-to-peak separation becomes very small or is difficult to detect.

A two-point calibration using a single low pH/low conductivity buffer and a high pH/high conductivity buffer has been tested but leads to less accurate results.

## Conclusion

A practical voltammetric method for pH measurement has been introduced. This method allows a cyclic voltammogram to be corrected for the interfering ohmic resistance which shifts the redox potentials away from their theoretical values. A fast-scan voltammogram at 1 V/s is used to determine the solution resistance. Then a moderate scan at 0.1 V/s is used for pH measurement and ageing control.

Table 1: Voltammetric pH measurement of beverage samples. Peak potentials and currents are average of five voltammetry cycles. Active surface area:  $A = 1.9315 \text{ cm}^2$ . Calibration based on four buffer solutions:  $\text{pH} = (706.8 - E/\text{mV})/69.9$  and resistivity  $\rho = (RA/\Omega\text{cm}^2 - 44.9)/0.8333$ .

Sample	v V/s	Reference values		Data of voltammetric pH measurement									
		pH	$\rho$ k $\Omega$ cm	$E_{p,Ox}$ V	$I_{p,Ox}$ mA	$E_{p,Red}$ V	$I_{p,Red}$ mA	$R_e$ $\Omega$	RA $\Omega$ cm <sup>2</sup>	$E_{1/2}$ (V)	pH	$\rho$ k $\Omega$ cm	
Apple juice	1	3.25	0.43	0.7824	1.210	0.2130	-1.050	226.7	437.8	0.4622	3.50	0.47	
	0.1			0.5241	0.167	0.4105	-0.122						
Apple spritzer	1	3.87	0.53	0.7851	1.112	0.1493	-0.953	280.3	541.5	0.4322	3.93	0.60	
	0.1			0.4890	0.155	0.3864	-0.116						
Coke	1	2.56	0.80	1.0766	1.583	0.0244	-1.413	332.2	641.7	0.5225	2.63	0.72	
	0.1			0.6464	0.252	0.4229	-0.179						
Mineral water	1	6.85	1.73	0.7779	0.865	-0.4588	-0.755	728.6	1407.2	0.2523	6.50	1.64	
	0.1			0.5586	0.154	-0.0231	-0.112						
Lemonade	1	3.55	1.16	0.9685	0.998	0.0057	-0.876	483.5	934.0	0.4520	3.64	1.07	
	0.1			0.5599	0.159	0.3656	-0.115						
Coffee	1	5.45	0.78	0.7324	1.053	-0.0266	-0.711	397.8	768.4	0.3410	5.23	0.87	
	0.1			0.4515	0.179	0.2613	-0.101						
Mate iced tea	1	3.13	1.55	1.0713	0.961	0.0189	-0.817	559.8	1081.3	0.4702	3.38	1.24	
	0.1			0.6349	0.170	0.3398	-0.109						

---

## References:

- [1] P. Kurzweil, Metal Oxides and Ion-Exchanging Surfaces as pH Sensors in Liquids: State-of-the-Art and Outlook, *Sensors* 2009, 9, 4955-4985.
- [2] W. Olthuis, M.A.M. Robben, P. Bergveld, M. Bos, W.E. van der Linden, pH Sensor Properties of Electrochemically Grown Iridium Oxide, *Sensors and Actuators B: Chemical* 1990, 2, 247-256.
- [3] P. Virtanen, R. Gommers, T.E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, et al., SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python, *Nat. Methods* 2020, 17, 261-272.
- [4] R. Woods, Hydrogen Adsorption on Platinum, Iridium and Rhodium Electrodes at Reduced Temperatures and the Determination of Real Surface Area, *Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 1974, 49(2), 217-226.
- [5] S.M. Alia, K.E. Hurst, S.S. Kocha, B.S. Pivovar, Mercury Underpotential Deposition to Determine Iridium and Iridium Oxide Electrochemical Surface Areas, *J. Electrochem. Soc.* 2016, 163, F3051-F3056.

## 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



**Christof Dinkelbach, M.Eng.**

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

c.dinkelbach@oth-aw.de



**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

# Demonstrationsversuche zur Rückgewinnung von kritischen Metallen

## Zusammenfassung

Chlorhaltige Kunststoffabfälle, die vor allem Polyvinylchlorid (PVC) enthalten, werden hauptsächlich thermisch verwertet. Hierbei muss das erzeugte Hydrogenchlorid (HCl) aus dem Verbrennungsgas durch Neutralisation entfernt und die dabei entstehenden Salze entsorgt werden. Eine alternative Methode stellt die rohstoffliche Nutzung durch ein Pyrolyseverfahren dar, um das erzeugte HCl zur Chlorierung von kritischen Metallen aus einem weiteren Abfallstrom nutzbar zu machen. Das Recycling kritischer Metalle durch chemisches Recycling von PVC-haltigen Kunststoffabfällen ist ein vielversprechender Ansatz zur Lösung zweier wichtiger Probleme (PVC-Entsorgung und Rückgewinnung kritischer Metalle) in der Abfallwirtschaft. Dies wird im Rahmen des Projekts „CHM-Technologie“ auf den Demonstrationsmaßstab übertragen. Verschiedene PVC-haltige Kunststoffabfälle wurden pyrolysiert, um HCl-reichen Dampf zu erzeugen. Dieser HCl-reiche Dampf wird in einem zweiten Schritt zur Chlorierung von Indium in LCD-Panels oder LEDs verwendet. Indiumchlorid hat einen niedrigeren Siedepunkt als Indiumzinnoxid und verdampft. Dieses wird gekühlt und bildet zusammen mit den zersetzten flüchtigen Stoffen der LED ein Metallkonzentrat. Der Chlorgehalt in den Rückständen der PVC-haltigen Kunststoffabfälle wird reduziert. Die Produkte sind feste Rückstände, Metallkonzentrat und Gas, die letztendlich für andere Zwecke wiederverwendet werden können.

## Abstract

Chlorine-containing plastic waste, which mainly consists of polyvinyl chloride (PVC), is primarily recycled thermally. In this process, the hydrogen chloride (HCl) produced must be removed from the combustion gas by neutralization and the resulting salts must be disposed of. An alternative method is to use the raw materials in a pyrolysis process to make the HCl produced usable for chlorinating critical metals from another waste stream. The recycling of critical metals through chemical recycling of PVC-containing plastic waste is a promising approach to solving two important problems (PVC disposal and recovery of critical metals) in waste management. This is being transferred to demonstration scale as part of the “CHM Technology” project. Various PVC-containing plastic wastes were pyrolyzed to produce HCl-rich steam. In a second step, this HCl-rich steam is used to chlorinate indium in LEDs. Indium chloride has a lower boiling point than indium tin oxide and evaporates. This is cooled and, together with the decomposed volatile substances in the LED, forms a metal concentrate. The chlorine content in the residues of the PVC-containing plastic waste is reduced. The products are solid residues, metal concentrate, and gas, which can ultimately be used for other purposes.

---

## 1 Einleitung

Die bayerische Industrie veröffentlichte 2024 eine Studie „Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft“. Auf dieser Liste sind verschiedene Rohstoffe wie Indium, Germanium oder Metalle der seltenen Erden, die als versor-

gungskritisch eingestuft wurden. Bei diesen Rohstoffen existiert ein höheres Risiko gegenüber anderen Rohstoffen hinsichtlich eines Versorgungsengpasses und dessen Folgen für die Wirtschaft (vbw 2024). Um diese kritischen

Metalle aus Abfallströmen zurückzugewinnen, wurden bisher verschiedene Prozesse, meist hydrometallurgische Verfahren, angewendet.

Mangels wirtschaftlichen Interesses werden daher viele kritische Metalle wie Indium in LEDs oder LCD-Panels in gängigen Recyclingprozessen nicht wiedergewonnen, sodass sie dem Wirtschaftskreislauf irreversibel verloren gehen.

Gleichzeitig betrug in Deutschland die Menge der Polyvinylchlorid (PVC)-Abfälle 861.000 Mg im Jahr 2021, wobei 57 % davon energetisch verwertet wurden (Conversio 2022). Bei dieser Verwertung entstehen, selbst bei Abfällen mit geringen Chloranteilen, hohe Entsorgungskosten infolge einer aufwändigen Abgasreinigung und Schäden durch Korrosion. Eine weitere Möglichkeit neben einem werkstofflichen Recycling für vergleichsweise reine PVC-Abfälle oder der energetischen Verwertung ist die rohstoffliche Verwertung und Wiederverwendung von Hydrogenchlorid (HCl).

Das Recycling kritischer Metalle durch chemisches Recycling von PVC-haltigen Kunststoffabfällen ist ein vielversprechender Ansatz zur Lösung zweier wichtiger Probleme (PVC-Entsorgung und Rückgewinnung kritischer Metalle) in der Abfallwirtschaft. Aufgrund einer ersten positiven ökonomischen sowie ökologischen Bewertung des Verfahrens im Labormaßstab wurden diese Schritte im Projekt „CHM-Technologie“ in größerem Maßstab umgesetzt.

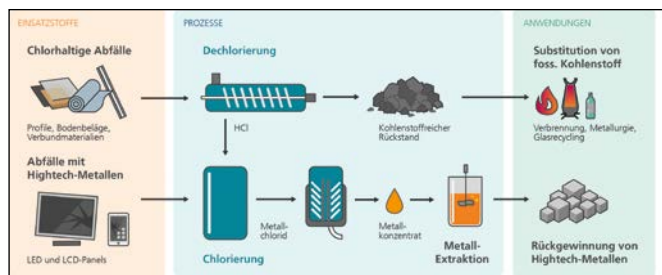


Abbildung 1: Lösungsansatz zur Verwertung von chlorhaltigen Kunststoffabfällen und Recycling von Indium

## 2 Praktische Arbeiten

### 2.1 Einsatzmaterial und Analysemethoden

#### 2.1.1 Einsatzmaterial

Für die Tests wurden PVC-Kunststoffmischungen aus Gewerbeabfällen, aus Leichtverpackungen, aus Industrieabfällen und eine Flake Reste aus CreaSolv®-Prozess verwendet. Die PVC-haltigen Kunststoffabfälle wurden pelletiert. EoL-LED-Stableuchten und LCD-Panels wurden für die Versuche auf < 20 mm zerkleinert.

#### 2.1.2 Analysemethoden

Energiedispersive Röntgenfluoreszenzspektroskopie: Der Elementgehalt in den Eingangsmaterialien und Produkten wurde mit dem Röntgenspektrometer Epsilon 3XLE von PANalytical Kassel analysiert. Das Gerät wurde mit dem Standard „omnian“ von PANalytical Kassel kalibriert und die Daten wurden mit der Software Epsilon Benchtop desselben Herstellers ausgewertet. Die festen Proben wurden zur Analyse mit der Retsch-Schneidmühle bei 600 U/min auf < 1 mm zerkleinert.

Induktiv gekoppelte Plasma-Emissionsspektroskopie (ICP-OES): Die ICP-Messungen wurden mit einem Spectro Arcos ICP-OES im Dual-Side-Plasma-Modus durchgeführt. Das ICP war mit einem Querstromzerstäuber, einer Scott-Sprühkammer und einem festen Glasbrenner mit 1,8-mm-Injektor ausgestattet. Die Messbedingungen waren: HF-Leistung 1350 W, Plasmagasdurchfluss 14 l/min, Zerstäuberdurchfluss 0,75 l/min und Hilfgasdurchfluss 1,3 l/min. Die Probenansaugrate wurde auf 2,0 ml/min eingestellt. Die Wellenlänge für Cl betrug 134,724 nm und der Regressionskoeffizient ( $r_2$ ) der Kalibrierungskurve lag bei 0,9995.

#### 2.2 Versuchsaufbau

Für jeden Pyrolysetest wurde das entsprechende Ausgangsmaterial in den Auffangbehälter des Systems gegeben. Vor Beginn der Pyrolysebehandlung wurde im kalten Zustand eine Druckprüfung durchgeführt, um die Dichtigkeit des Systems zu überprüfen. Mit komprimiertem Stickstoff wurde das System auf einen Druck gebracht, der über dem während des Tests zu erwartenden Überdruck lag. Der Test wurde erst gestartet, als das System den Überdruck aufrechterhalten konnte und somit davon ausgegangen werden konnte, dass keine Undichtigkeiten vorlagen.

Anschließend wurde das System mit Stickstoff (28 l/min) gespült, um eine inerte Atmosphäre zu schaffen. Schließlich wurde die Reaktionskammer mit einem elektrischen Mantelheizgerät auf die Testtemperatur erhitzt. Das Material wurde dann über einen Schneckenförderer in den Reaktor zugeführt. Der während des Pyrolyseprozesses entstehende feste Koks wurde nach einer Verweilzeit von 30 Minuten kontinuierlich in einen Behälter ausgetragen. Das aus dem Pyrolysereaktor erzeugte Gas wurde zur Chlorierung von LEDs bzw. LCD-Panels verwendet, die ebenfalls semi-kontinuierlich im Chlorierungsreaktor hinzugegeben wurden. Hier reagiert das Indium zu Indiumchlorid und verdampft. Das Indiumchlorid kondensiert mit der flüssigen Ölfraction des Pyrolysedampfes und erzeugt ein Metallkonzentrat. Das verbleibende Gas wurde anschließend in einem Wasserwäscher von Halogenen, insbesondere überschüssigem HCl, gereinigt, um Salzsäure zu erzeugen, und das Gas wurde in einem

Natriumhydroxidwäscher weiter gereinigt. Aerosole wurden am ESP entfernt. Die Gasphase wurde dann mit einem Gasanalysator der Firma Pollutek analysiert und aus Sicherheitsgründen bei ca. 950 °C mit einer Gasfackel abgefackelt.



Abbildung 2: Bild der Pyrolyseanlage in Kombination mit dem Chlorierungsreaktor.

### 3 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Die ICP-OES/EDXRF-Analyse der Eingangsmaterialien Feststoffrückstand und Metallkonzentrat aus den Tests mit den PVC-Abfällen zeigen eine unerwartete Verteilung des Chlors. Zwischen 19 % und 89 % des Chlors verbleiben im Feststoffrückstand des PVC-Kunststoffgemischs, zwischen 6 % und 79 % im Feststoffrückstand der LED bzw. LCD-Panel und zwischen 2 % und 34 % im gefilterten Metallkonzentrat. Das restliche Chlor befindet sich jeweils im Gaswäscher. Der hohe Chlorgehalt im Feststoffrückstand der PVC-Abfälle lässt sich durch die Bildung von Salz – wahrscheinlich Calciumchlorid – aufgrund calciumhaltiger Füllstoffe in Kunststoffen erklären. Darüber hinaus begünstigen zwei Umstände die Salzbildung

im Pyrolyseprozess. Erstens führt die hohe Temperatur aufgrund der Entfernung von Kunststoffen aus den Füllstoffen zur Salzbildung. Zweitens führt die Granulierung des Materials zu einer besseren Vermischung der verschiedenen Kunststoffmaterialien sowie des Kunststoffs mit Füllstoffen und PVC. Andere Metalle vor allem in den LEDs können ebenfalls mit HCl reagieren, allerdings ist die Temperatur vermutlich zu niedrig, damit die weiteren gebildeten Metallchloride verdampfen. Nach dem Versuch wurden die flüssigen Metallkonzentrate filtriert.

Indium wurde aus dem Metallkonzentrat aus LCD-Panels durch Mischen mit Wasser, Phasentrennung, Destillation und Elektrolyse zurückgewonnen. Das gefilterte Metallkonzentrat wurde mit Wasser gemischt. Das Indium reichert sich in der Wasserphase an. Nach der Destillation enthält die Lösung 0,2 g In/L. Das Metall Indium konnte mithilfe einer Gewinnungselektrolyse zurückgewonnen werden. 40 % des Indiums aus der LED wurden in der Wasserphase gefunden, und ab hier wäre die Aufarbeitung dieselbe wie bei den LCD-Panels.

Der Pyrolyseprozess und die Kombination mit der Rückgewinnung kritischer Metalle konnte hiermit im Demonstrationsmaßstab kontinuierlich überführt werden. Diese Technologie könnte auch für andere kritische Metalle wie Silizium aus Photovoltaikmodulen eingesetzt werden. Das chemische Recycling von PVC-haltigen Kunststoffabfällen zur Rückgewinnung kritischer Metalle ist ein vielversprechender Weg, um zwei wichtige Probleme der Abfallwirtschaft zu lösen.

---

#### Referenzen:

- [1] Verband der bayerischen Wirtschaft (2024, Dezember). Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft. [Online]. Verfügbar: [https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2024/Downloads/241204\\_Rohstoffstudie\\_IWC\\_final.pdf](https://www.vbw-bayern.de/Redaktion/Frei-zugaengliche-Medien/Abteilungen-GS/Wirtschaftspolitik/2024/Downloads/241204_Rohstoffstudie_IWC_final.pdf) (letzter Zugriff am 26.08.2025)
- [2] Conversio Market & Strategy GmbH (2022, Dezember): Stoffstrombild PVC in Deutschland 2021. Zahlen und Fakten zum Lebensweg von PVC. [Online] Verfügbar: [https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2023/01/PVC\\_Analyse\\_DE\\_2021\\_Kurzversion\\_final.pdf](https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2023/01/PVC_Analyse_DE_2021_Kurzversion_final.pdf) (letzter Zugriff am 26.08.2025)

### **Projektpartner:**

Fraunhofer UMSICHT Institutsteil Sulzbach-Rosenberg, 92237 Sulzbach-Rosenberg  
Lober GmbH & Co. KG, 92431 Neunburg vorm Wald  
GRAMET GmbH & Co. KG, 97082 Würzburg

### **Fördergeber:**

Das Projekt „CHM-Technologie“ wird im Rahmen des Projektverbundes „ForCYCLE TECHNIKUM“ vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert und vom Ressourceneffizienz-Zentrum Bayern (REZ) am Bayerischen Landesamt für Umwelt koordiniert.



finanziert durch  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



## KONTAKT



**Michael Peer, M.Sc.**

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



**Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger**

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

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

## Volumenberechnung mit Hilfe von Schwerpunktfasern

### Zusammenfassung

Das Volumen eines unregelmäßig geformten Körpers lässt sich mit den bekannten Formeln aus der Integralrechnung oft nur mühsam bestimmen. Im vorliegenden Beitrag gehen wir einen neuen Weg: Wir zerlegen einen Körper in Scheiben senkrecht zu einer vorgegebenen Raumkurve. Falls diese Kurve die besondere Eigenschaft hat, dass sie stets durch die Flächenschwerpunkte der senkrechten Querschnitte verläuft, dann erhalten wir eine einfache Formel zur Volumenberechnung, die man als Verallgemeinerung der zweiten Guldinschen Regel auffassen kann. Ausgehend von diesen als Schwerpunktfasern bezeichneten Kurven können wir dann beispielsweise einen Körper ohne Volumenänderung deformieren, und es ergibt sich die Möglichkeit, den Körperschwerpunkt eines gebogenen Stabs relativ leicht zu ermitteln.

### Abstract

The volume of a very curved solid (such as a tube-like body) is often difficult to calculate with the methods of classical calculus. In this article, we take a new approach: We cut a solid into slices perpendicular to a given space curve. If this curve has the special property that it always passes through the centroids of the perpendicular cross-sections, then we obtain a simple formula for calculating the volume. This formula can be regarded as a generalized version of the second Pappus-Guldin theorem. Starting from these curves, which are referred to as centroid fibres, it is also possible to deform a body without changing its volume, and we can even determine the centroid of a bent rod in a relatively simple manner.

Das Volumen eines Körpers, der sich wie in Abbildung 1 entlang der  $x$ -Achse erstreckt, lässt sich mit der Formel  $V = \int_a^b A(x) dx$  berechnen, wobei  $A(x)$  den Inhalt der Schnittfläche bei  $x \in [a, b]$  parallel zur  $(y, z)$ -Ebene bezeichnet. Im Prinzip denkt man sich hier den Körper aus „infinitesimal“-dünnen Scheiben mit der Grundfläche  $A(x)$  und der Höhe  $dx$  zusammengesetzt. Zerteilt man den Körper nicht mehr in parallele Scheiben, sondern schneidet man ihn entlang einer gekrümmten Kurve und stets senkrecht zu dieser auf, dann passt die Annäherung durch zylindrische Scheiben nicht mehr. Es stellt sich die Frage, wie man in diesem Fall das Volumen berechnet.

Einen ersten Hinweis liefert uns die zweite Guldinsche Regel: Dreht man einen Bereich  $D$  in der  $(x, y)$ -Ebene mit dem Flächeninhalt  $A$  um die  $x$ -Achse, dann ist  $V = A \cdot 2\pi y_s$  das Volumen dieses Rotationskörpers, wobei  $y_s$  den Abstand des Flächenschwerpunkts von

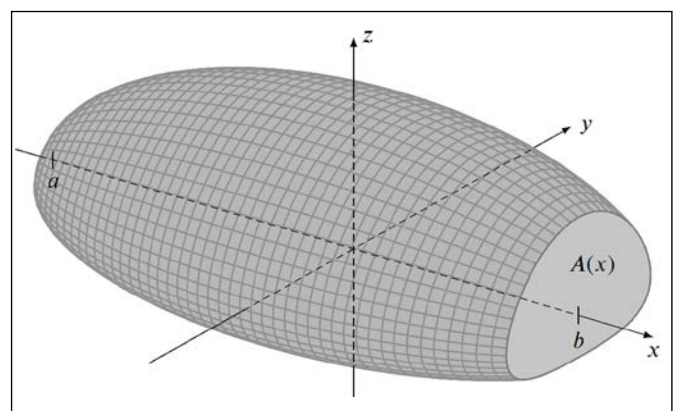


Abbildung 1: Ein Körper mit den Schnittflächen  $A(x)$  senkrecht zur  $x$ -Achse.

der  $x$ -Achse bezeichnet (siehe Abbildung 2). Mit anderen Worten: Das Volumen ist das Produkt aus der Querschnittsfläche  $A$  und dem vom Schwerpunkt zurückgelegten Weg  $L = 2\pi y_s$ . Die Guldinsche Formel zeigt, dass bei

der Volumenberechnung längs einer Kurve (hier: eines Kreises) auch der Schwerpunkt der Schnittfläche eine Rolle spielt. Es wurden bereits einige Verallgemeinerungen der Guldinschen Regel angegeben. Geht man beispielsweise von einem ebenen Bereich  $D$  mit dem Flächeninhalt  $A$  aus und bewegt man diesen entlang einer Raumkurve  $\gamma$  so, dass der Querschnitt senkrecht zur Kurve stets kongruent zu  $D$  ist und  $\gamma$  stets durch den Schwerpunkt des Querschnitts verläuft, dann entsteht ein röhrenförmiger Körper wie in Abbildung 3 mit konstanter Querschnittsfläche. Sofern sich dieser nicht selbst durchdringt, ist das Volumen dieses Körpers gegeben durch  $V = A \cdot L$ , wobei  $L$  die Länge der Kurve  $\gamma$  bezeichnet (siehe [1]). Im Artikel [2], welcher die Grundlage für den vorliegenden Bericht bildet, werden noch allgemeinere Körper untersucht, bei denen die Querschnitte zur Kurve nicht mehr deckungsgleich sein müssen, so dass sich insbesondere deren Flächeninhalte  $A(s)$  beim Durchlauf der Kurve ändern können.

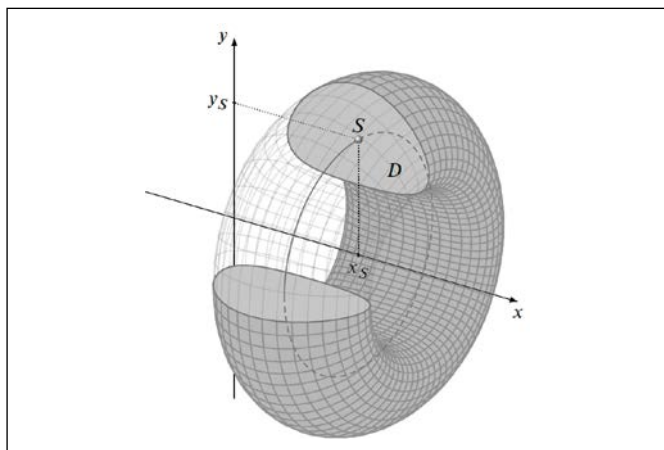


Abbildung 2: Durch Drehung einer Fläche  $D$  um die  $x$ -Achse entsteht ein Rotationskörper, wobei der Flächenschwerpunkt  $S$  einen Kreis beschreibt.

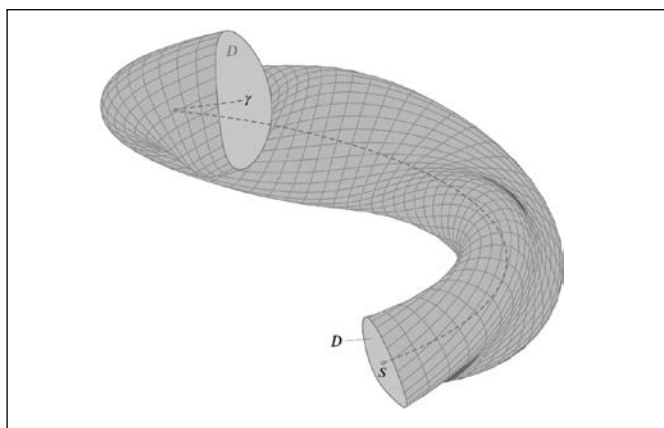


Abbildung 3: Bewegt man eine ebene Fläche  $D$  im Schwerpunkt entlang einer Kurve  $\gamma$ , sodass  $D$  stets senkrecht zur Kurve liegt, dann erhält man einen röhrenförmigen Körper mit der Schwerpunktfaser  $\gamma$ .

Für die Berechnung des Volumens solcher Körper spielen Schwerpunktfasern eine wichtige Rolle: Eine Schwerpunktfaser in einem Körper ist eine Raumkurve  $\gamma: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^3$  mit der Eigenschaft, dass jeder Kurvenpunkt

$\gamma(s)$  zugleich der Schwerpunkt der Querschnittsfläche senkrecht zum Tangentenvektor  $T(s) = \dot{\gamma}(s)$  ist. Die Kurve wird dabei nach der Bogenlänge parametrisiert, so dass stets  $|T(s)| = 1$  gilt. Falls eine solche Schwerpunktfaser bekannt ist, dann lässt sich das Volumen des Körpers ganz einfach mit der Formel

$$V = \int_{\gamma} A(s) ds \quad (1)$$

berechnen, wobei  $A(s)$  den Flächeninhalt des senkrechten Querschnitts bei  $\gamma(s)$  bezeichnet. Diese Formel ist nicht viel komplizierter als die eingangs genannte Volumenformel; man muss lediglich das bestimmte Integral über  $[a, b]$  durch ein Kurvenintegral ersetzen. Einen mathematischen Beweis für (1) findet man in [2], Abschnitt 2. Aus dieser Formel ergibt sich auch die folgende Aussage: *Wird ein Körper mit der Schwerpunktfaser  $\gamma$  so verformt, dass  $\gamma$  eine Schwerpunktfaser bleibt und sich die Flächeninhalte der dazu senkrechten Querschnitte nicht ändern, dann bleibt auch das Volumen des Körpers gleich.* Ein Beispiel, wie ein Körper ohne Volumenänderung deformiert werden kann, zeigt Abbildung 4. Falls die Kurve  $\gamma$  nicht durch die Schwerpunkte der Querschnitte verläuft, dann lässt sich ebenfalls eine Formel für die Volumenberechnung angeben, siehe Theorem 1 in [2], welche allerdings komplizierter ist als (1), da diese auch die Lage der Flächenschwerpunkte berücksichtigen muss. Im Hinblick auf die einfache Formel (1) sind Schwerpunktfasern also ein sehr nützliches Werkzeug zur Volumenberechnung. Dies führt uns zur Frage: Wie findet man – rein rechnerisch – die Schwerpunktfasern in einem gegebenen Körper  $K$ ?

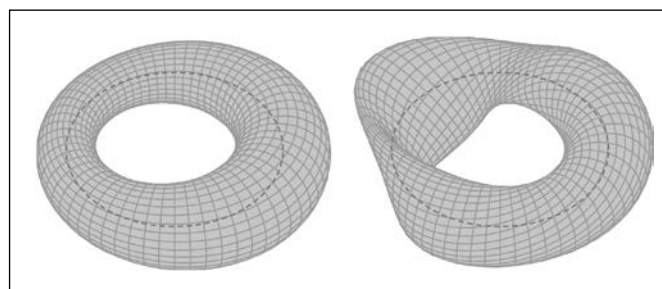


Abbildung 4: Zwei volumengleiche schlauchförmige Körper mit gleicher Schwerpunktfaser, wobei jeweils auch die senkrechten Querschnitte den gleichen Flächeninhalt haben.

Wegen der Schwierigkeiten, die bei einer komplizierten Körperform zu erwarten sind, wollen wir uns auf einen konvexen Körper mit hinreichend glatter Oberfläche beschränken. Hierfür kann man die folgende Aussage zeigen: *Für einen Punkt  $p$  im Inneren von  $K$ , der sich hinreichend nahe am Rand des Körpers befindet, gibt es immer ein Stück einer Schwerpunktfaser, die durch  $p$  verläuft, sich bis zum Rand von  $K$  fortsetzen lässt und dort senkrecht auf den Rand trifft.* Erstaunlicherweise lässt sich der mathematische Beweis dieser Aussage (siehe [2], Abschnitt 3) auf ein bekanntes Gesetz aus der Hydrostatik zurückführen.

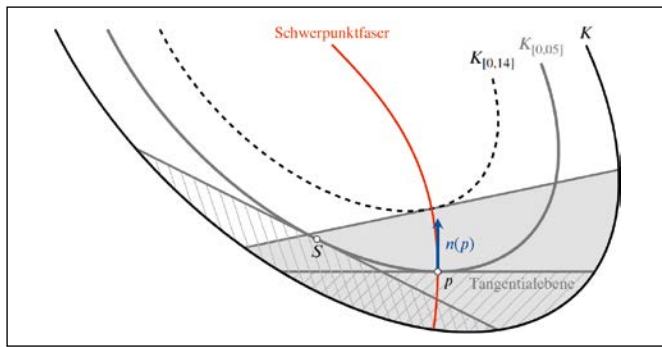


Abbildung 5: Querschnitt durch einen konvexen Körper. Die schraffierten Bereiche zeigen, wie weit der Körper mit dem spezifischen Gewicht  $\delta=0,05$  in zwei verschiedenen Lagen in eine Flüssigkeit mit dem spezifischen Gewicht 1 eintauchen würde. Die schraffierten Abschnitte haben das gleiche Volumen, und sie berühren den Schwimmkörper jeweils genau im Schwerpunkt  $S$  bzw.  $p$  der Schnittflächen.

Taucht ein homogener Körper  $K$  mit dem spezifischen Gewicht  $0 < \delta < 1/2$  in ein Fluid mit dem spezifischen Gewicht 1 ein, dann hängt die Eintauchtiefe gemäß dem Archimedischen Prinzip nur vom Volumen des verdrängten Mediums ab. Der Teil im Inneren von  $K$ , der bei beliebiger Drehlage des Körpers nie in das Fluid eintaucht, wird Schwimmkörper zum Parameter  $\delta$  genannt und mit  $K_{[\delta]}$  bezeichnet. Bereits im Jahr 1822 hat der französische Mathematiker und Ingenieur Charles Dupin bei theoretischen Untersuchungen zu schwimmenden Körpern festgestellt, dass die Tangentialebene in einem beliebigen Randpunkt  $p$  des Schwimmkörpers  $K_{[\delta]}$  eine ebene Fläche aus dem Körper  $K$  schneidet, deren Flächenschwerpunkt mit  $p$  übereinstimmt, vgl. Abbildung 5 und [3], Kapitel XXXI, Abschnitt IV. Hieraus lässt sich folgern, dass die nach innen gerichteten Einheitsnormalenvektoren  $n(p)$  zu den Schwimmkörpern ein Richtungsfeld für die gesuchten Schwerpunktfasern bilden, und diese müssen demnach die Differentialgleichung

$$\dot{\gamma}(s) = n(\gamma(s)) \quad (2)$$

erfüllen. Mit Hilfe von (2) kann man beispielsweise die Schwerpunktfasern eines Ellipsoids mit den Halbachsen  $a, b, c$  berechnen. Die Schwerpunktfaser durch einen vorgegebenen Punkt  $p_0 = (x_0, y_0, z_0)$  im Inneren des Ellipsoids ist im Fall  $x_0 > 0$  gegeben durch die Raumkurve

$$y(x) = y_0 \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right)^{a^2/b^2}, \quad z(x) = z_0 \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right)^{a^2/c^2}, \quad x \geq 0$$

(siehe [2], Abschnitt 4) und für ein konkretes triaxiales Ellipsoid in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die Schwerpunktfaser wird dort durch Punktspiegelung in den Halbraum  $x < 0$  fortgesetzt. Wir können für  $x \in [-a, 0]$  aber auch die Schwerpunktfaser  $y(x) = z(x) = 0$  wählen. Dieses Beispiel zeigt, dass Schwerpunktfasern durch einen gegebenen Punkt im Allgemeinen nicht eindeutig sind. Eine noch offene Frage ist, ob sich bei einem beliebigen konvexen Körper der von  $p$  aus durch (2) berechnete Teil einer Schwerpunktfaser immer auch durch den ganzen Körper, also von Rand zu Rand, fortsetzen lässt.

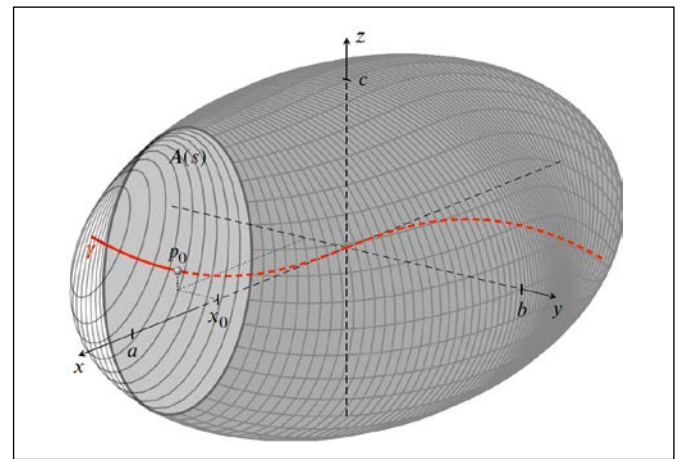


Abbildung 6: Schwerpunktfaser  $y(x) = -0,3(x/0,8)^{2,56}$ ,  $z(x) = 0,18(x/0,8)^4$ ,  $x \in [0, 0,8]$  im Ellipsoid mit den Halbachsen  $a = 1$ ,  $b = 0,625$ ,  $c = 0,5$ . Die Schnittfläche bei  $p_0$  senkrecht zur Kurve ist eine Ellipse mit dem Mittelpunkt  $p_0$ .

Die Differentialgleichung (2) kann je nach Form des Körpers mehr oder weniger aufwändig zu lösen sein. Allerdings gibt es auch Situationen, in denen eine Schwerpunktfaser bereits bekannt ist, so wie bei einem gebogenen Stab oder Balken, dessen Schwerpunktfaser durch Deformation einer geraden Linie entsteht. Als Beispiel betrachten wir einen ebenen Bereich  $D$  in der  $(y, z)$ -Ebene mit dem Flächeninhalt  $A$ , der entweder zur  $y$ -Achse oder zur  $z$ -Achse symmetrisch ist und dessen Schwerpunkt im Ursprung liegt. Verschieben wir diesen Bereich längs der  $x$ -Achse von  $x=0$  bis  $x=L$  gemäß Abbildung 7 oben, dann entsteht ein stabförmiger Körper mit dem Volumen  $V = A \cdot L$ . Verbiegen wir nun die Strecke  $[0, L]$  auf der  $x$ -Achse zu einer gleichlangen Raumkurve  $\gamma: [0, L] \rightarrow \mathbb{R}^3$  mit dem Tangentenvektor  $|T(s)| = 1$ , dem Normalenvektor  $N(s) = -T'(s)$  und dem Binormalenvektor  $B(s) = T(s) \times N(s)$ , dann beschreibt

$$K = \{\gamma(s) + y \cdot N(s) + z \cdot B(s) : (s, y, z) \in [0, L] \times D\}$$

den gebogenen Stab, dessen Querschnitte senkrecht zu  $\gamma$  kongruent zu  $D$  sind, wobei  $\gamma$  durch die Schwerpunkte der senkrechten Querschnitte verläuft, vgl. Abbildung 7 unten. Sofern dieser Stab nicht zu stark gebogen wird, findet auch keine Selbstdurchdringung statt. Die Raumkurve  $\gamma$  ist dann eine Schwerpunktfaser des Körpers  $K$ , so dass dieser ebenfalls das Volumen  $V = A \cdot L$  besitzt. Die Schwerpunktfaser eines gebogenen Stabs wird in der Festigkeitslehre gelegentlich auch als neutrale Faser bzw. axiale Kurve bezeichnet (siehe [4] oder [5], Abschnitt 2). In [2], Abschnitt 5 wird eine einfache Beziehung zwischen dem Körperschwerpunkt  $S_K$  des gebogenen Stabs  $K$  und dem geometrischen Schwerpunkt  $S_\gamma$  seiner neutralen Faser  $\gamma$  hergestellt. Sie lautet

$$S_K = S_\gamma + \frac{I_z}{A \cdot L} \cdot (T(0) - T(L)), \quad (3)$$

wobei  $I_z$  das Flächenträgheitsmoment von  $D$  zur  $z$ -Achse bezeichnet. Gemäß dieser Formel stimmen also der

Körperschwerpunkt und der Schwerpunkt der neutralen Faser in der Regel *nicht* überein. Die Abweichung hängt von der Verbiegung ab, welche im Wesentlichen durch den Vektor  $T(o) - T(L)$  gegeben ist. Für den Spezialfall eines Kreisbogens erhält man aus (3) u. a. die in [6] auf Seite 322 angegebenen Formeln für die Schwerpunktkoordinaten. Bei einer geschlossenen Kurve gilt  $T(o) = T(L)$ , so dass hier Körper- und Kurvenschwerpunkt tatsächlich auch zusammenfallen. Beispielsweise haben die beiden schlauchförmigen Körper in Abbildung 4 ihren Schwerpunkt jeweils genau im Mittelpunkt der gestrichelten Kreise.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Schwerpunktfasern nicht nur für die Volumenberechnung hilfreich sind, sondern auch bei der Untersuchung von Zusammenhän-

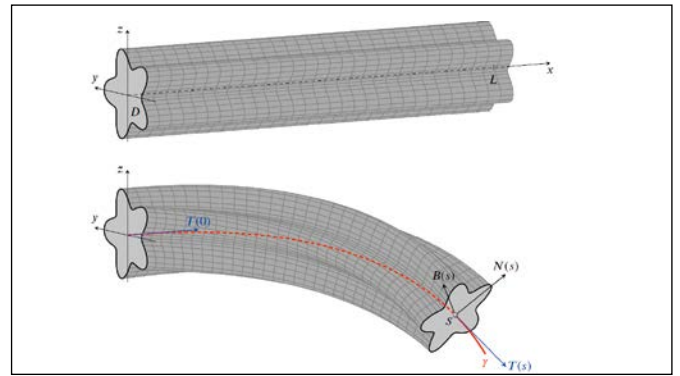


Abbildung 7: Ein elastischer Stab, oben im Ausgangszustand und unten in gebogener Form, mit der Schwerpunktfaser  $\gamma$ .

gen zwischen verschiedenen Größen aus der Technischen Mechanik sehr nützlich sein können.

### Referenzen:

- [1] A. W. Goodman, G. Goodman, Generalizations of the Theorems of Pappus, The American Mathematical Monthly 76 (4), 355-366, 1969.
- [2] H. Schmid, A generalization of the second Pappus-Guldin theorem, Results in Applied Mathematics 25C, 100537, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.rinam.2025.100537>
- [3] P. Appell, Traité de mécanique rationnelle, Tome 3: Équilibre et mouvement des milieux continus, Gauthier-Villars, 1952.
- [4] E.H. Dill, Kirchhoff's Theory of Rods. Archive for History of Exact Sciences 44, 1-23, 1993.
- [5] M. Lembo, On nonlinear deformations of nonlocal elastic rods, International Journal of Solids and Structures 90, 215-227, 2016.
- [6] T. J. Cloete, Extensions to the theorems of Pappus to determine the centroids of solids and surfaces of revolution, International Journal of Mechanical Engineering Education 51 (4), 227-332, 2023.

### KONTAKT



Prof. Dr. Harald Schmid

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

[h.schmid@oth-aw.de](mailto:h.schmid@oth-aw.de)

# Einfluss von statischen Magnetfeldern auf das Wachstum von Mikroalgen

## Zusammenfassung

Das Wachstum von Mikroalgen wird im Wesentlichen durch die Energieversorgung mit Licht sowie die Verfügbarkeit von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorquellen bestimmt. In dieser Studie wurde die Hypothese untersucht, dass statische Magnetfelder einen positiven Einfluss auf die Kultivierung des Cyanobakteriums *Arthrospira platensis* haben. Die Wachstumscharakteristika wurden mithilfe des Modells nach Jung et al. [1], basierend auf der Monod-Kinetik, analysiert. Die Ergebnisse zeigen eine erhöhte Lichtaffinität: Die Halbsättigungskonstante ( $K_s$ ) für Licht war in den magnetisch behandelten Kulturen um etwa 30 % geringer als in den Kontrollkulturen. Dies weist auf eine verbesserte Fähigkeit von *A. platensis* hin, bereits bei niedrigen Lichtintensitäten effizient zu wachsen. Die vorliegenden Ergebnisse stellen eine erste Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Rolle von Magnetfeldern bei der Optimierung der Mikroalgenkultivierung dar.

## Abstract

The growth of microalgae is primarily determined by the supply of light energy and the availability of carbon, nitrogen, and phosphorus sources. In this study, the hypothesis was tested that static magnetic fields exert a positive influence on the cultivation of the cyanobacterium *Arthrospira platensis*. Growth characteristics were analyzed using the model proposed by Jung et al. [1], which is based on Monod kinetics. The results indicate an increased light affinity: the half-saturation constant ( $K_s$ ) for light was approximately 30 % lower in magnetically treated cultures compared to the controls. This suggests an improved ability of *A. platensis* to grow efficiently under low light intensities. These findings provide a basis for further research on the role of magnetic fields in optimizing microalgal cultivation processes.

## 1 Einleitung

Mikroalgen sind einzellige, photosynthetisch aktive Organismen, die sowohl eukaryotisch als auch prokaryotisch vorkommen können. Ihr Mechanismus der Energiegewinnung entspricht grundsätzlich dem höherer Pflanzen, bietet jedoch Vorteile wie ein deutlich schnelleres Wachstum sowie die Unabhängigkeit von Bodenqualität und Standortbedingungen. Aufgrund dieser Eigenschaften gewinnt die Kultivierung von Mikroalgen zunehmend an Bedeutung in der Verfahrenstechnik, insbesondere in der Abwasserreinigung, der Bioenergieproduktion sowie bei der Herstellung von Feinchemikalien und Therapeutika [2].

Ein zentraler Parameter für die Entwicklung biotechnologischer Prozesse mit Mikroalgen ist die Lichtversorgung. Im Gegensatz zu löslichen Nährstoffen lässt sich Licht nicht homogen in der Kulturflüssigkeit verteilen; seine Verfügbarkeit ist stark abhängig von Eindringtiefe, Reaktorgeometrie und Biomassekonzentration [1]. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wird intensiv nach alternativen Einflussfaktoren geforscht, die das Wachstum von Mikroalgen entweder weniger lichtabhängig machen oder insgesamt fördern.

Deamici et al. untersuchten den Einfluss statischer Magnetfelder auf das Wachstum von *A. platensis* und konnten zeigen, dass diese sowohl die spezifische Wachstumsrate als auch die maximale Biomassekonzentration steigern,

was zu einer bis zu 100 % höheren Produktivität führte [3]. Ähnliche Effekte wurden auch für andere Arten beschrieben [4]. Darüber hinaus wurde berichtet, dass Magnetfelder die CO<sub>2</sub>-Fixierung [3] sowie die Sauerstoffproduktion [5] positiv beeinflussen. Die Liste der beobachteten Auswirkungen magnetischer Felder auf Biomassezusammensetzung, Stoffwechsel und Zellstrukturen ist umfangreich; der zugrunde liegende biologische Mechanismus ist jedoch bislang nicht vollständig verstanden [6].

An der Fakultät MBUT widmen wir uns diesem Thema interdisziplinär. Ziel ist es, sowohl grundlegende biologische Mechanismen aufzuklären als auch die gewonnenen Erkenntnisse für eine verfahrenstechnische Optimierung nutzbar zu machen. In diesem Bericht werden erste Versuchsaufbauten und Ergebnisse dieser Arbeiten vorgestellt.

## 2 Methodisches Vorgehen

### 2.1 Reaktor-Set-Up

Für die Untersuchungen zum Einfluss von Magnetfeldern wurden Photobioreaktoren (Blasensäulen, Durchmesser 5 cm, Arbeitsvolumen 1 L) so modifiziert, dass durch Permanentmagnete (siehe Abbildung 1) ein Magnetfeld definierter Stärke erzeugt werden konnte. Die Feldstärke wurde über den Abstand der Magnete variiert. Die Konstruktion ermöglicht eine einfache Demontage der Magneteinheiten und damit die Untersuchung verschiedener Expositionszeiten.

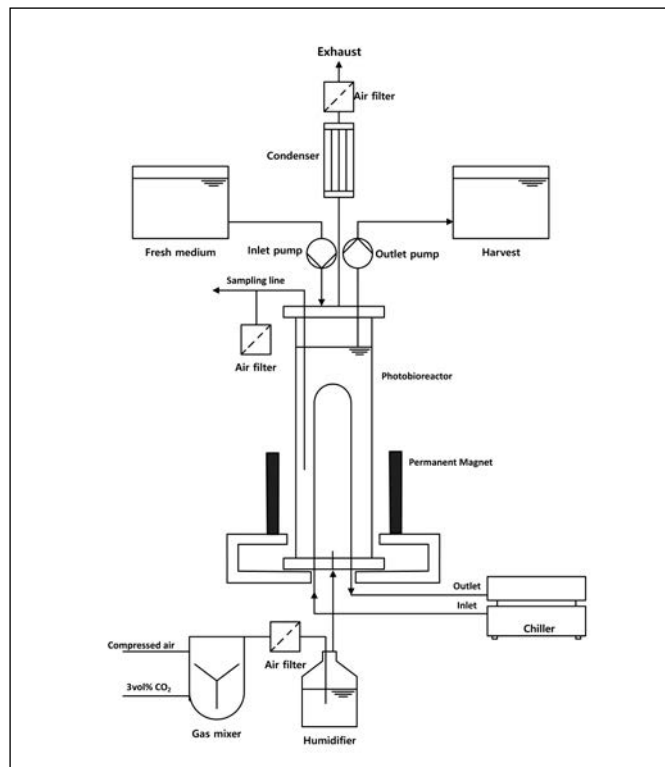


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des modifizierten Photobioreaktors zur Kultivierung von Mikroalgen unter definierten statischen Magnetfeldern.

### 2.2 Berechnung magnetischer Felder

Das Magnetfeld der Permanentmagnete wurde unter Anwendung der zweidimensionalen Finite-Elemente-Methode als statisches und nichtlineares Problem bestimmt. In die Symmetrieachse des Reaktors wurde die Neumann-Randbedingung angesetzt, so dass nur das Feld eines halben Reaktors zu berechnen war, siehe Abbildung 2 (links). Als Materialkennwerte des Trägermaterials wurde Baustahl S235JR verwendet, wobei für die Remanenzflussdichte des ferritischen Permanentmagneten ein Wert von  $B_r = 385 \text{ T}$  angesetzt wurde.

Ziel war das Erreichen mittlerer Normalflussdichten im Reaktor von bis zu 40 mT, wobei eine Reduktion dieses Wertes auf bis zu 30 mT durch Vergrößerung des Abstandes in x-Richtung zwischen den Magneten erreicht werden sollte. Deshalb wurde zur Berechnung der maximale Magnetabstand von 120 mm angesetzt. Anschließend wurde nach Ausgestaltung des magnetischen Rückchlusses die Magnethöhe derart bestimmt, dass bei dem festgelegten maximalen Abstand eine mittlere Normalinduktion von mindestens 30 mT sicher erreicht werden konnte.

Hierzu wurden in z-Richtung die Normalflussdichten sowohl in der Reaktormitte als auch an der Glasoberfläche des Reaktors ermittelt. Durch die hohen Streuanteile war zu erwarten, dass die Normalflussdichte in Richtung des Reaktorzentrums abfällt, was durch die Rechnung bestätigt wurde, siehe Abbildung 2 (rechts). Bei einer Magnethöhe von 15 mm errechneten sich die mittleren Normalflussdichten von 33,9 mT auf der Reaktoroberfläche entlang der Glaswandung sowie 31,6 mT im Reaktorzentrum. Mit diesem Wert für die Magnethöhe wurden die 30 mT bei maximalem Abstand und ebenso die 40 mT bei Reduktion des Abstands der Magnete sicher erreicht. Folglich wurden Ferritmagnete mit einer Magnethöhe von 15 mm ausgewählt.

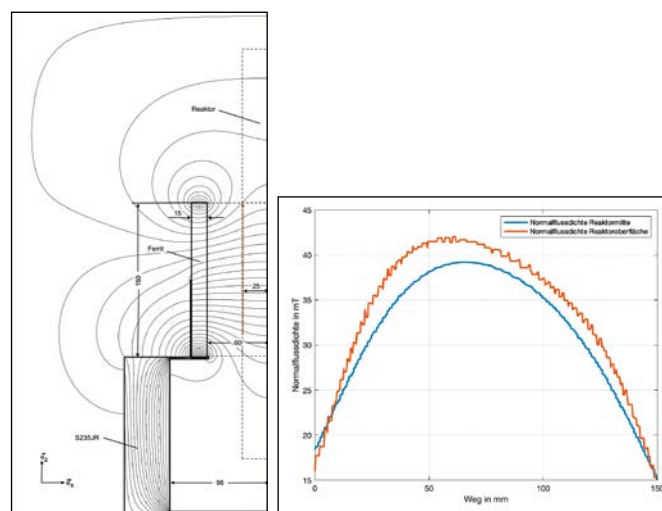


Abbildung 2: Feldbild (links) und Verlauf der Normalflussdichten (rechts) in Reaktormitte und Reaktoroberfläche für eine Magnethöhe von 15 mm

### 2.3 Kultivierung und Bestimmung der Wachstumsscharkarakteristika

Die Kultivierung des Cyanobakteriums *Arthrospira platensis* erfolgte im Batchbetrieb bei einer Lichtintensität von  $60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  unter einem Hell-Dunkel-Zyklus von 12 h und einer Temperatur von  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  im Standardkulturmedium SOT. Für jeden Versuchsparameter wurden zwei parallele Kultivierungen durchgeführt, um aus derselben Vorkultur stets eine Referenzkultur betreiben zu können.

Bei den magnetfeldexponierten Kulturen wurden Magnetfeldstärken von 30 mT und 40 mT eingestellt. Die Exposition erfolgte über 1 h pro 24 h beziehungsweise kontinuierlich (24 h pro 24 h) und wurde jeweils zu denselben Zeitpunkten innerhalb des Beleuchtungszyklus durchgeführt.

Der Kulturverlauf wurde über 15 Tage hinweg durch tägliche Probenahmen und photometrische Messungen der optischen Dichte bei 750 nm dokumentiert. Zur Beschreibung der Wachstumskinetik wurde das Modell nach Jung et al. verwendet, das für lichtlimitiertes Wachstum geeignet ist [1]. Aus den Modellanpassungen wurden die Parameter  $\mu_{\text{max}}$  und  $K_s$  bestimmt. Die Modellierung war mit einem Likelihood-Ratio-Test gekoppelt, um signifikante Unterschiede zwischen den Kulturen statistisch zu bewerten.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Alle Kulturverläufe zeigten eine deutliche Lichtinhibition. Nach einer anfänglichen exponentiellen Wachstumsphase ging das Wachstum im weiteren Verlauf infolge des zunehmenden Verschattungseffekts der Biomasse in einen nahezu linearen Verlauf über. Dieses Verhalten lässt sich direkt aus den charakteristischen Biomasseverläufen der Kulturen ablesen und wird durch die Modellanpassung mit dem lichtlimitierten Wachstumsmodell nach Jung et al. [1] bestätigt.

Im direkten Vergleich der Kulturverläufe mit Magnetfeldexposition zu den Kontrollkulturen zeigte sich – unabhängig von Magnetfeldstärke und Expositionsdauer – nach einem anfänglich deckungsgleichen Wachstum eine stärkere Biomassezunahme bei den Kulturen unter Magnetfeldeinfluss (vgl. Abbildung 3).

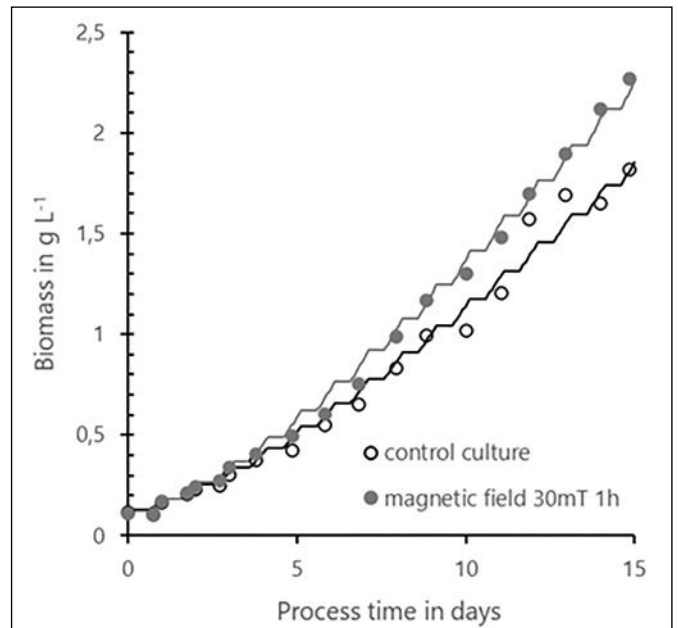


Abbildung 3: Kulturverlauf von *A. platensis*

In den frühen Phasen der Kultivierung kann aufgrund der geringen Biomassekonzentrationen noch von einem nicht limitierten Wachstum ausgegangen werden. Unter dieser Annahme unterscheiden sich die maximalen spezifischen Wachstumsraten ( $\mu_{\text{max}}$ ) der Kulturen nicht wesentlich und liegen bei etwa  $\mu_{\text{max}} = 2,3 \text{ d}^{-1}$ . Unterschiede im späteren Kulturverlauf, in dem Lichtlimitierung durch Selbstverschattung auftritt, sind daher auf Variationen in der Lichtaffinität zurückzuführen, die durch den Halbsättigungskoeffizienten  $K_s$  beschrieben wird.

Die  $K_s$ -Werte der magnetfeldexponierten Kulturen sind signifikant geringer als die der Kontrollkulturen ( $K_s = 36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Für die Kultur mit einer kontinuierlichen Exposition bei 40 mT ergab sich  $K_s = 32 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , während die Kulturen mit einer einstündigen täglichen Exposition bei 30 mT einen  $K_s = 28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  und bei 40 mT einen  $K_s = 30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  aufwies. Die statistische Auswertung (vgl. Tabelle 1) zeigt, dass diese Unterschiede in den  $K_s$ -Werten hoch signifikant sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Exposition gegenüber magnetischen Feldern das Wachstum von *A. platensis* beeinflusst. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Algen unter Magnetfeldeinfluss eine höhere Lichtausnutzung aufweisen und somit für ihr Wachstum eine geringere effektive Lichtintensität benötigen.

Tabelle 1: Ergebnisse des Likelihood-Ratio-Tests für magnetische Feldstärken

Versuch	$p_0$	$p_1$	$SSE_0$	$SSE_1$	LR	df	p-Wert	Ergebnis
30 mT (1h)	5	6	0,994	0,326	74,80	1	$5,19 \times 10^{-18}$	hoch signifikant ( $\Delta K_s$ )
40 mT (1h)	5	6	1,068	0,300	82,52	1	$1,5 \times 10^{-19}$	hoch signifikant ( $\Delta K_s$ )
40 mT (24h)	5	6	0,712	0,411	35,12	1	$3,1 \times 10^{-9}$	hoch signifikant ( $\Delta K_s$ )

---

## Referenzen:

- [1] Jung, S. H.; McHardy, C.; Rauh, C.; Jahn, A.; Luzi, G.; Delgado, A.; Buchholz, R.; Lindenberg, C. A new approach for calculating microalgae culture growth based on an inhibitory effect of the surrounding biomass (Bioprocess and Biosystems Engineering, (2021), 44, 8, (1671-1684), 10.1007/s00449-021-02550-6). Bioprocess and Biosystems Engineering 2021, 44 (10), 2229. DOI: 10.1007/s00449-021-02594-8.
- [2] Cogo Badan, I.; Jung, S.-H.; Singh, R.; Vivekanand, V.; Knappert, J.; Rauh, C.; Lindenberg, C. Life Cycle Assessment of Exopolysaccharides and Phycocyanin Production with *Arthrospira platensis*. Fermentation 2024, 10 (3), 163. DOI: 10.3390/fermentation10030163.
- [3] Deamici, K. M.; Costa, J. A. V.; Santos, L. O. Magnetic fields as triggers of microalga growth: evaluation of its effect on *Spirulina* sp. Bioresource technology 2016, 220, 62-67. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.08.038.
- [4] Font, Y. S.; Díaz, Y. O.; Cuypers, A.; Alemán, E. I.; Vandamme, D. The effect of magnetic field treatment on the cultivation of microalgae: An overview of involved mechanisms. J Appl Phycol 2023, 35 (4), 1525-1536. DOI: 10.1007/s10811-023-02994-1.
- [5] Tu, R.; Jin, W.; Xi, T.; Yang, Q.; Han, S.-F.; Abomohra, A. E.-F. Effect of static magnetic field on the oxygen production of *Scenedesmus obliquus* cultivated in municipal wastewater. Water research 2015, 86, 132-138. DOI: 10.1016/j.watres.2015.07.039.
- [6] Deamici, K. M.; Dziergowska, K.; Silva, P. G. P.; Michalak, I.; Santos, L. O.; Detyna, J.; Kataria, S.; Brestic, M.; Sarraf, M.; Islam, M. Microalgae Cultivated under Magnetic Field Action: Insights of an Environmentally Sustainable Approach. Sustainability 2022, 14 (20), 13291. DOI: 10.3390/su142013291.

## KONTAKT



**Prof. Dr. Christoph Lindenbergler**

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

[c.lindenbergler@oth-aw.de](mailto:c.lindenbergler@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Bernhard Frenzel**

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

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



**Alexander Reinhardt, M.Sc.**

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

[a.reinhardt2@oth-aw.de](mailto:a.reinhardt2@oth-aw.de)



**Nico Pilz**

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

[n.pilz@oth-aw.de](mailto:n.pilz@oth-aw.de)



**Sebastian Betz**

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

[s.betz2@oth-aw.de](mailto:s.betz2@oth-aw.de)



**Matthias Maderer**

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

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

# Methode zur Quantifizierung der Inhibierung der Methanproduktion durch die Makroalge *Asparagopsis taxiformis*

## Zusammenfassung

Biomasse der Makroalge *Asparagopsis taxiformis* kann als Futterzusatz den Methanausstoß von Wiederkäuern signifikant reduzieren. Da es sich bei der Biomasse um ein Naturprodukt handelt, können je nach Kultivierungsbedingungen die Eigenschaften und Zusammensetzung stark variieren. In diesem Bericht wird ein Biogasexperiment im Batchbetrieb als analytische Methode zur Ermittlung der methaninhibierenden Eigenschaften vorgestellt.

## Abstract

Biomass from the macroalgae *Asparagopsis taxiformis* can significantly reduce methane emissions from ruminants when used as a feed supplement. Since algal biomass is a natural product, its properties and composition can vary depending on cultivation conditions. This report presents the use of a batch biogas experiment as an analytical method for determining methane-inhibiting properties.

## 1 Einleitung

Der Weltklimarat (IPCC) hat wiederholt betont, wie dringend es ist, sofortige und wirksame Maßnahmen zur Eindämmung des anthropogenen Klimawandels zu ergreifen [1]. Ein wesentlicher Verursacher der globalen Treibhausgasemissionen ist der Agrar- und Lebensmittelsektor, der für 26 % der weltweiten CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen (CO<sub>2</sub>-eq.) verantwortlich ist [2]. Unter den verschiedenen Teilspektoren sticht die Milchproduktion als bedeutender Emittent hervor, der etwa 4 % der gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen verursacht, hauptsächlich aufgrund von Methan (CH<sub>4</sub>), das bei der Verdauung in Wiederkäuern freigesetzt wird [3]. Dies unterstreicht die dringende Notwendigkeit, die Emissionen im Milchsektor zu reduzieren. Neben Strategien wie Suffizienz und Konsistenz im Lebensmittelbereich ist ein vielversprechender Ansatz die Verbesserung der Prozesseffizienz, um einen nachhaltigen Lebenszyklus zu gewährleisten. Dazu gehören Methoden zur Vermeidung und Reduzierung von CH<sub>4</sub>-Emissionen an der Quelle. Ein besonders vielversprechender Ansatz ist hier die rote Makroalge *Asparagopsis taxiformis* als Futtermittelzusatz [4]. Diese marine Makroalge enthält Bromoform (CHBr<sub>3</sub>), eine halogenierte Verbindung, die nachweislich die

Methanogenese im Pansen wirksam hemmt [4]. Bromoform als halogeniertes Methanalogon wirkt als Hemmstoff der Methanogenese, hauptsächlich aufgrund seiner Wirkung auf die Aktivität der Coenzym-M-Methyltransferase und der Methyl-Coenzym-M-Reduktase, die am Wolfeyklus in methanogenen Archaeen beteiligt sind [5-9]. Experimentelle Versuche haben gezeigt, dass bei einer Zufütterung von 2 % *A. taxiformis*-Biomasse der organischen Trockenmasse eine Methanreduktion von bis zu 99 % erreicht werden kann [10]. Ein weiterer Vorteil der Verwendung von *A. taxiformis* als Futterzusatz ist die um bis zu 51 % erhöhte durchschnittliche tägliche Gewichtszunahme von Wiederkäuern bei einer Zusatzfütterung von 0,1 % *A. taxiformis* der organischen Substanz [11]. In der Literatur werden häufig aufwendige Langzeitstudien in Form von Tierversuchen zur Untersuchung der Inhibierung der Methanproduktion durchgeführt. Um den analytischen Aufwand zur Untersuchung der im Rahmen des INZELLA-Projekts kultivierten Biomasse zu minimieren und auch eine Untersuchung von Kleinstmengen zu ermöglichen, wurde ein simpler methodischer Ansatz etabliert.

## 2 Methodik

Die Methode zur Untersuchung der Verringerung der Methanproduktion nutzt einen Ansatz zur Biogasproduktion im Satzbetrieb. Hierbei werden gasdichte Fläschchen mit einem Septum zur Probenahme mit Maissilage als Substrat, *A. taxiformis*-Biomasse und frischem Gärrest einer Biogasanlage befüllt. Die genauen Zusammensetzungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Dabei stellt o den reinen Gärrest, M Gärrest unter Zugabe von Substrat und A I-V Gärrest unter Zugabe von Substrat und verschiedenen Mengen von Algenbiomasse dar. Zur Einstellung des gleichen Wassergehalts wurde zusätzlich destilliertes Wasser zugegeben.

Tabelle 1: Zusammensetzung der einzelnen Biogasexperimente. oTS = organische Trockensubstanz

Sample-ID	oTS <i>A. taxiformis</i> [g]	oTS Mais [g]	oTS Gärrest [g]
o	0	0	1,20
M	0	0,40	0,80
A I	0,0002	0,40	0,80
A II	0,0005	0,40	0,80
A III	0,0009	0,40	0,80
A IV	0,0018	0,40	0,80
A V	0,0035	0,40	0,80

Die angemischten Flaschen wurden gasdicht verschlossen und auf einem temperierten Schüttler bei einer Frequenz von 110 rpm und einer Temperatur von 35 °C über die gesamte Versuchsdauer platziert. In regelmäßigen zeitlichen Abständen wurde die produzierte Biogasmenge und Biogaszusammensetzung (CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub>) gemessen. Aus den erhobenen Daten kann im Anschluss die Biogasqualität unter Verwendung von Formel 1 und Methanreduzierung mithilfe von Formel 2 berechnet werden. Dabei stehen c<sub>CH<sub>4</sub></sub> und c<sub>CO<sub>2</sub></sub> für die CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentration im Biogas sowie m<sub>CH<sub>4</sub></sub> für die absolut produzierte Masse CH<sub>4</sub> des jeweiligen Experiments.

$$\text{Biogasqualität} = \frac{c_{\text{CH}_4}}{c_{\text{CO}_2}} \quad (1)$$

$$\text{Methanreduktion} = \frac{m_{\text{CH}_4, \text{Referenz}}}{m_{\text{CH}_4, \text{Probe}}} \quad (2)$$

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Der zeitliche Verlauf der produzierten Biogasmenge ist in Abbildung 1 dargestellt. Direkt nach dem Animpfen mit frischem Gärrest ist ein starker Anstieg der Biogasproduktion zu erkennen. Nach 20 Tagen ist ein Abflachen der Biogasproduktion zu erkennen. Das Abflachen der Biogasproduktion ist durch Substratmangel zu begründen, der aus Abbau der organischen Trockensubstanz resultiert.

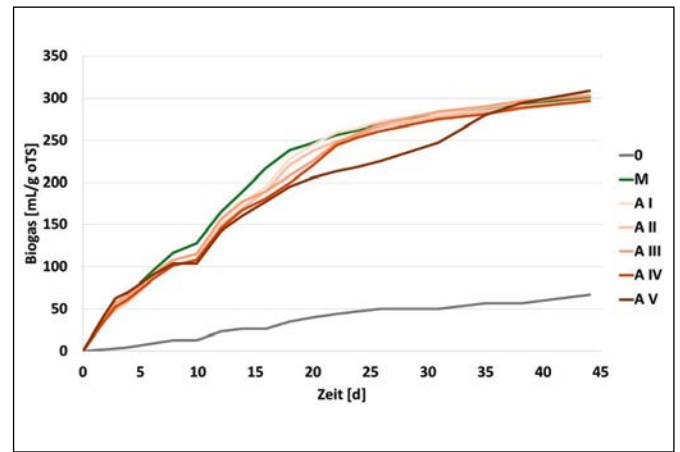


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der produzierten Biogasmenge bezogen auf die verwendete Menge organischer Trockensubstanz

Abbildung 2 zeigt die gemittelte Biogasqualität der einzelnen Versuche. Dabei wurde bei einer Zugabe von 0,06 % organischer Trockensubstanz (*oTS*) *A. taxiformis* mit 1,06 die höchste Biogasqualität erreicht (A I). Es lässt sich erkennen, dass bei steigender Zugabe von *A. taxiformis*, weniger Methan im Verhältnis zu CO<sub>2</sub> produziert wird. Die geringste Biogasqualität wurde bei einer Zugabe von 1 % *oTS* mit einem CH<sub>4</sub> zu CO<sub>2</sub> Verhältnis von 0,8 erreicht. A I weist eine um 0,05 erhöhte Biogasqualität im Vergleich zur Referenz M auf. Dies könnte durch die Inhomogenität der verwendeten Maissilage und das Fehlen einer Dreifachbestimmung begründet werden.

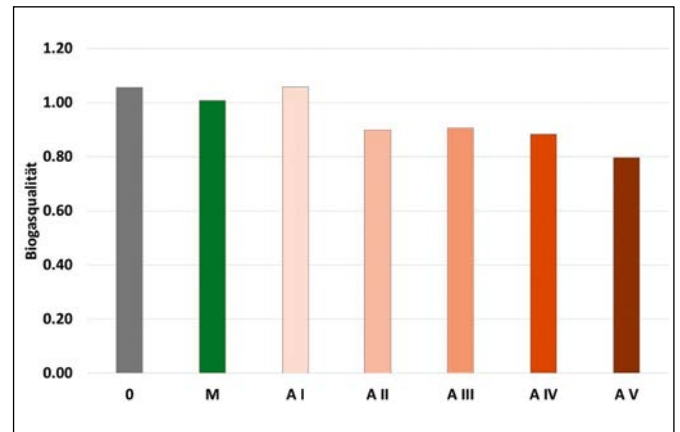


Abbildung 2: CH<sub>4</sub>-zu-CO<sub>2</sub>-Verhältnis als Indikator der Biogasqualität.

Abbildung 3 zeigt die Methanreduktion, welche unter Verwendung von Formel 2 für jedes Experiment berechnet wurde. Hierbei wird das absolut produzierte Methan ins Verhältnis mit der Referenz gesetzt. Bei steigender Zugabe von Algenbiomasse lässt sich eine Steigerung der Methaninhibierung feststellen. Die geringste Methaninhibierung von 24,9 % wurde unter Zugabe von 0,06 % *A. taxiformis*-oTS erreicht. Eine maximale Methaninhibierung von 45,6 % wurde in A IV und A V bei einer Zugabe von 0,5 und 1,0 % *oTS A. taxiformis*-Biomasse erreicht.

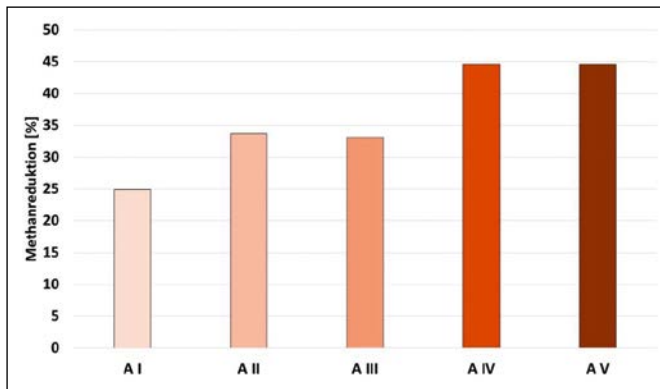


Abbildung 3: Methaninhibierung als Verhältnis zwischen der absolut produzierten Methanmenge der Referenz und Experimenten mit Zugabe von *A. taxiformis*-Biomasse.

## 4 Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich anhand der erhobenen Daten bestätigen, dass in den Batch-Biogasexperimenten die Methaninhibierung untersucht werden kann. Um Rückschlüsse auf bromierte Kohlenwasserstoffe ziehen zu können und gegebenenfalls das Verhalten der Mikroorganismen genauer untersuchen zu können, sind weitere dreifachbestimmte Datenpunkte notwendig. Außerdem muss die Bromoformkonzentration sowie anderer bromierter Kohlenwasserstoffe für eine Kalibrierung des Messsystems ermittelt werden.

### Referenzen:

- [1] H. Lee und J. Romero, Climate Change 2023 : synthesis report / edited by the Core Writing Team, Hoesung Lee, Jose Romero. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [2] J. Poore und T. Nemecek, “Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers”, Science (New York, N.Y.), Jg. 360, Nr. 6392, S. 987-992, 2018, doi: 10.1126/science.aaq0216.
- [3] A. Singaravadivelan et al., “Life cycle assessment of greenhouse gas emission from the dairy production system - review”, Trop Anim Health Prod, Early Access. doi: 10.1007/s11250-023-03748-4.
- [4] K. M. Posman et al., “The antimethanogenic efficacy and fate of bromoform and its transformation products in rumen fluid”, Sci Rep, Early Access. doi: 10.1038/s41598-025-10936-9.
- [5] C. R. Glasson et al., “Benefits and risks of including the bromoform containing seaweed *Asparagopsis* in feed for the reduction of methane production from ruminants”, Algal Research, Jg. 64, S. 102673, 2022. doi: 10.1016/j.algal.2022.102673. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926422000443>
- [6] T. Bauchop, “Inhibition of rumen methanogenesis by methane analogues”, Journal of bacteriology, Jg. 94, Nr. 1, S. 171-175, 1967, doi: 10.1128/jb.94.1.171-175.1967.
- [7] U. E. Krone, K. Laufer, R. K. Thauer und H. P. Hogenkamp, “Coenzyme F<sub>430</sub> as a possible catalyst for the reductive dehalogenation of chlorinated C<sub>1</sub> hydrocarbons in methanogenic bacteria”, Biochemistry, Jg. 28, Nr. 26, S. 10061-10065, 1989, doi: 10.1021/bio0452a027.
- [8] L. Machado, M. Magnusson, N. A. Paul, R. Kinley, R. de Nys und N. Tomkins, “Identification of bioactives from the red seaweed *Asparagopsis taxiformis* that promote antimethanogenic activity in vitro”, J Appl Phycol, Jg. 28, Nr. 5, S. 3117-3126, 2016. doi: 10.1007/s10811-016-0830-7. [Online]. Verfügbar unter: [https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-016-0830-7?utm\\_source=getftr&utm\\_medium=getftr&utm\\_campaign=getftr\\_pilot&getft\\_integrator=sciencedirect\\_contenthosting](https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-016-0830-7?utm_source=getftr&utm_medium=getftr&utm_campaign=getftr_pilot&getft_integrator=sciencedirect_contenthosting)
- [9] J. M. Wood, F. S. Kennedy und R. S. Wolfe, “The reaction of multihalogenated hydrocarbons with free and bound reduced vitamin B<sub>12</sub>”, Biochemistry, Jg. 7, Nr. 5, S. 1707-1713, 1968, doi: 10.1021/bio0845a013.
- [10] L. Machado, M. Magnusson, N. A. Paul, R. Kinley, R. de Nys und N. Tomkins, “Dose-response effects of *Asparagopsis taxiformis* and *Oedogonium* sp. on in vitro fermentation and methane production”, J Appl Phycol, Jg. 28, Nr. 2, S. 1443-1452, 2016. doi: 10.1007/s10811-015-0639-9. [Online]. Verfügbar unter: [https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-015-0639-9?utm\\_source=getftr&utm\\_medium=getftr&utm\\_campaign=getftr\\_pilot&getft\\_integrator=sciencedirect\\_contenthosting](https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-015-0639-9?utm_source=getftr&utm_medium=getftr&utm_campaign=getftr_pilot&getft_integrator=sciencedirect_contenthosting)
- [11] R. D. Kinley, G. Martinez-Fernandez, M. K. Matthews, R. de Nys, M. Magnusson und N. W. Tomkins, “Mitigating the carbon footprint and improving productivity of ruminant livestock agriculture using a red seaweed”, Journal of Cleaner Production, Jg. 259, S. 120836, 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120836. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620308830>

## Fördergeber:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

## KONTAKT



**Simon Schneider, B.Eng.**

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

s.schneider@oth-aw.de



**Singh Rickwinder, M.Tech.**

Malaviya National Institute of Technology (MNIT)  
Centre for Energy and Environment  
Jaipur, Rajasthan, 302017, India

2021REN9014@mnit.ac.in



**Bendix Wojaczek, M.Sc.**

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

b.wojaczek@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger**

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

c.lindenberger@oth-aw.de



Banking, so flexibel wie dein Leben.

**Wir sind die Bank, die immer für dich da ist!**

**Dein Studium. Deine Region. Deine Bank vor Ort.**

**Ob WG-Konto, Sparplan oder erste eigene Wohnung:**  
Wir begleiten dich verlässlich auf deinem Weg ins Berufsleben - online oder mit persönlicher Beratung, wenn du sie brauchst.

So erreichst du uns:

☎ 09621 479 - 0

🌐 [www.vr-as.de](http://www.vr-as.de)





**Verein der Amberger Freunde der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden e.V.**



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.

Werden Sie Teil unseres Fördervereins und unterstützen Sie die Weiterentwicklung der OTH Amberg-Weiden!  
Gemeinsam schaffen wir Chancen – für Forschung, Lehre und die Zukunft unserer Studierenden.

**Besuchen Sie unsere Homepage über [www.oth-aw.de/hochschule/kooperationen/foerderevereine/](http://www.oth-aw.de/hochschule/kooperationen/foerderevereine/)**

Sie wollen Mitglied werden? Kontaktieren Sie uns.

Michael Cerny, 1. Vorsitzender

E-Mail: [freunde.oth-amberg@oth-aw.de](mailto:freunde.oth-amberg@oth-aw.de)

Mitglied werden: 



MIT KRONES  
GEHÖRE ICH  
ZU EINEM  
STARKEN  
TEAM.





Studierende

#BEPARTOFKRONES



**Förderverein der OTH Weiden e.V.**

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

Die OTH AW 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 AW
- Förderung des OTH AW-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.foerdereverein-oth-weiden.de](http://www.foerdereverein-oth-weiden.de)

# Metabolic activity as a quantitative tool for biomass determination of suspension cultures of Basidiomycota

## Zusammenfassung

Eine präzise Biomasseüberwachung ist entscheidend für die Optimierung von Submerskultivierungsprozessen von Basidiomyceten, die wichtige Produzenten hochpreisiger bioaktiver Verbindungen, Enzyme und Pigmente sind. Ihre heterogene Morphologie in Suspensionskultur erschwert jedoch die direkte Quantifizierung. In dieser Studie wurde eine indirekte Methode entwickelt, bei der der Resazurin-Assay zur Messung der metabolischen Aktivität als Stellvertreter für die Biomasse eingesetzt wird. Es konnte eine starke lineare Korrelation zwischen dem Assay-Signal und der Konzentration der gefriergetrockneten Biomasse nachgewiesen werden, wodurch ein robustes Kalibrationsmodell für eine schnelle und zuverlässige Biomasseschätzung in Suspensionskulturen etabliert wurde.

## Abstract

Accurate biomass monitoring is critical for optimizing submerged cultivation processes of Basidiomycota, key producers of high-value bioactive compounds, enzymes, and pigments. However, their heterogeneous morphology in suspension culture complicates direct quantification. This study developed an indirect method using the resazurin assay to measure metabolic activity as a proxy for biomass. A strong linear correlation was demonstrated between the assay signal and freeze-dried biomass concentration, establishing a robust calibration model for rapid and reliable biomass estimation in suspension cultures.

## 1 Introduction

Basidiomycetes represent a vast and underexplored group of fungi with immense biotechnological potential, particularly to produce high-value metabolites such as enzymes, natural pigments, and bioactive compounds [1]. Despite this recognized potential, their industrial-scale exploitation remains limited, primarily due to the absence of standardized, mechanistically informed cultivation methodologies.

A critical bottleneck in this development is the inability to accurately monitor growth in submerged culture. In contrast to unicellular microorganisms or well-studied Ascomycetes, Basidiomycetes grow as intricate networks of hyphae that aggregate into pellets of heterogeneous size and density [2]. This complex morphological plasticity profoundly affects process performance by influencing

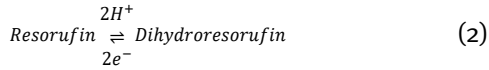
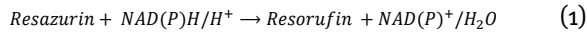
mass transfer, nutrient uptake, and metabolite productivity. Furthermore, it invalidates direct spectrophotometric methods and renders standard gravimetric analyses, such as dry weight measurement, tedious and destructive. The lack of a reliable, high-throughput biomass assay impedes the optimization of critical cultivation parameters and physiological studies essential for rational process design.

To overcome this fundamental limitation, this study investigated the use of resazurin, a redox dye that measures metabolic activity, as a proxy for biomass concentration [3]. This work establishes a novel calibration method that directly correlates resazurin reduction rates with absolute biomass, offering a simple and inexpensive solution for quantitative growth assessment in suspension cultures.

## 2 Methodology

Biomass of Basidiomycota was quantified indirectly by measuring metabolic activity using a resazurin assay. This method is based on the principle that active electron transport systems (ETS), which are universal indicators of cellular metabolism reduce the blue, weakly fluorescent dye resazurin to pink, strongly fluorescent resorufin. This resorufin can then be further reduced to dihydroresorufin, a colorless and non-fluorescent molecule. The NAD(P)H-dependent reduction rate is proportional to the number of metabolically active cells. A calibration curve was established by correlating the resazurin reduction rate (measured fluorometrically or calorimetrically) with known dry weights of freeze-dried fungal biomass, enabling the interpolation of biomass in unknown samples.

The reduction proceeds in two steps:



The kinetics of these reactions were modeled using a system of ordinary differential equations (ODEs):

$$-\frac{dC_{\text{Resazurin}}}{dt} = r_1 = k_1 * C_{\text{Resazurin}} * C_{\text{NAD(P)H}} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{\text{Resorufin}}}{dt} = r_2 = k_1 * C_{\text{Resazurin}} * C_{\text{NAD(P)H}} - k_2 * C_{\text{Resorufin}} \quad (4)$$

$$\frac{dC_{\text{Dihydroresorufin}}}{dt} = r_3 = k_2 * C_{\text{Resorufin}} \quad (5)$$

During the initial-rate period of the assay, the further reduction of resorufin to dihydroresorufin (governed by  $k_2$ ) is negligible compared to the production of resorufin from resazurin thus  $k_1 \gg k_2$ . Assuming an excess and effectively constant pool of NAD(P)H supplied by metabolically active biomass, the primary reduction reaction can be treated as pseudo-first order with respect to resazurin. Therefore, Equation 3 simplifies to:

$$r_1 = k_1^* * C_{\text{Resazurin}} \quad (6)$$

$$k_1^* = k_1 * C_{\text{NAD(P)H}} \quad (7)$$

The apparent rate constant  $k_1^*$  can be determined by monitoring the change in the absorption or fluorescence over time. Since  $k_1^*$  is proportional to the concentration of NAD(P)H, which in turn correlates with active biomass, a calibration was established by plotting  $k_1^*$  against known biomass concentrations. For absorption measurements, the decrease in resazurin absorbance was measured over time at 600 nm. The value  $k_1^*$  was determined by numerical simulating the absorbance data to:

$$A_{(\text{Resazurin})}(t) = A_{0(\text{Resazurin})} * e^{(-k_1^*(t))} \quad (8)$$

where  $A_{(\text{Resazurin})}(t)$  is the absorbance of resazurin at time, and  $A_{0(\text{Resazurin})}$  is the initial absorbance. For fluorescence measurements, the increase in resorufin fluorescence was measured over time at excitation 585 nm and emission 555 nm with time. The value of  $k_1^*$  was determined by numerical simulating the fluorescence data to:

$$RFU_{(\text{Resorufin})}(t) = RFU_{F(\text{Resorufin})}(1 - e^{(-k_1^*(t))}) \quad (9)$$

where  $RFU_{(\text{Resorufin})}(t)$  is the relative fluorescence units at time, and  $RFU_{F(\text{Resorufin})}$  is the maximum fluorescence signal upon complete reduction.

## 3 Experimental Protocol

To establish a calibration curve, experiments were performed with the fungal strains *Cystostereum murrayi*, *Terana caerulea*, and *Pleurotus dryinus*. For each strain, a suspension of fungal biomass was prepared and used to inoculate a series of five flasks, each containing 100 mL of SNL medium. The flasks were inoculated with varying, precisely measured amounts of biomass in increasing order to create a known concentration gradient. All cultures were incubated at 25 °C with shaking at 150 rpm, except for *Pleurotus dryinus* cultures used for absorption measurements, which were incubated at 30 °C. The resazurin assay was performed during the active growth phase.

- For absorption measurements, 1.5 mL of a resazurin stock solution (1 g/L) was added to each flask, resulting in a final concentration of 0.015 g/L.
- For fluorescence measurements, 0.15 mL of the resazurin stock solution (1 g/L) was added to each flask, resulting in a final concentration of 0.0015 g/L.

After the resazurin assay, the biomass from each flask was harvested. The entire flask contents were centrifuged at 5,000 × g for 10 min, after which the supernatant was discarded. The resulting pellet was washed with distilled water to remove residual medium components and subsequently lyophilized to constant dry cell weight (DCW) using freeze drying. The DCW of the biomass from each flask was then determined gravimetrically.

## 4 Result

### 4.1 Quantification of Biomass (Absorption Method)

A strong linear correlation was established between the apparent rate constant ( $k_1^*$ ) and DCW for all three fungal species, validating the assay for biomass quantification (see in Figure 1).

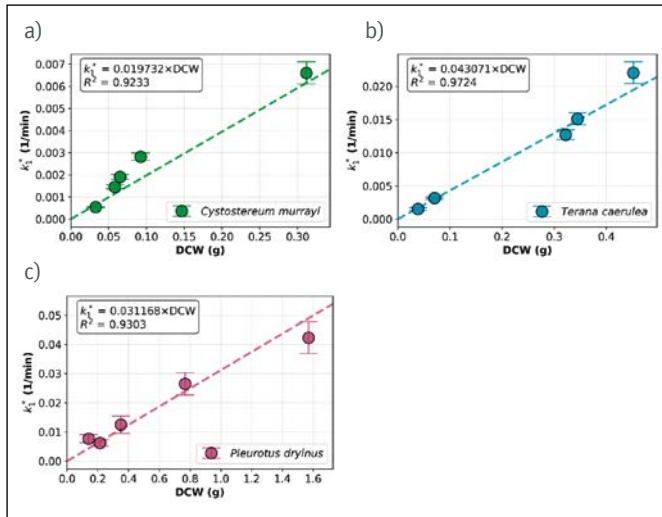


Figure 1: Calibration curves for biomass quantification *Cystostereum murrayi* (a), *Terana caerulea* (b) and *Pleurotus dryinus* (c)

The slope of the calibration curve, which represents the specific metabolic activity (the rate constant per gram of biomass), varied significantly among the species (Table 1). *Terana caerulea* demonstrated the highest specific activity, followed by *Pleurotus dryinus* and *Cystostereum murrayi*.

A key limitation of this absorption-based method is that some of the Basidiomycota species studied here began producing pigments after one week of cultivation. These pigments can overlap with the absorbance spectrum of resazurin, interfering with the measurement. Consequently, continuous monitoring is not feasible. Furthermore, this assay requires resazurin concentrations approximately ten times higher than fluorescence-based assays, which can lead to the formation of dihydroresorufin, a compound known to be toxic to fungi. Therefore, this method is best suited for endpoint measurements.

Table 1: Specific metabolic activity and DCW of the studied Basidiomycota

Species	Specific activity ( $\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>	Maximum DCW (g)
<i>Cystostereum murrayi</i>	0.019732 ± 0.001925	0.92	0.32
<i>Pleurotus dryinus</i>	0.031168 ± 0.002238	0.93	1.57
<i>Terana caerulea</i>	0.043071 ± 0.002161	0.97	0.45

#### 4.2 Quantification of Biomass (Fluorescence Method)

A strong linear correlation was also obtained for fluorescence-based biomass calibration, comparable to that of absorption-based methods. This calibration was applied to *Pleurotus dryinus* to determine specific metabolic activity at two cultivation time points, day 7 and day 14. The calculated values were consistent, measuring  $0.0221 \pm 0.0009 \text{ min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  on day 7 and

$0.0235 \pm 0.0016 \text{ min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  on day 14 (Figure 2). The similarity between these values indicates comparable metabolic activity during the growth phase. In contrast to absorption-based measurements, fluorescence-based calibration yielded lower specific activities, likely because assays were conducted at 25 °C. These findings validate the applicability of fluorescence calibration across different cultivation time points.

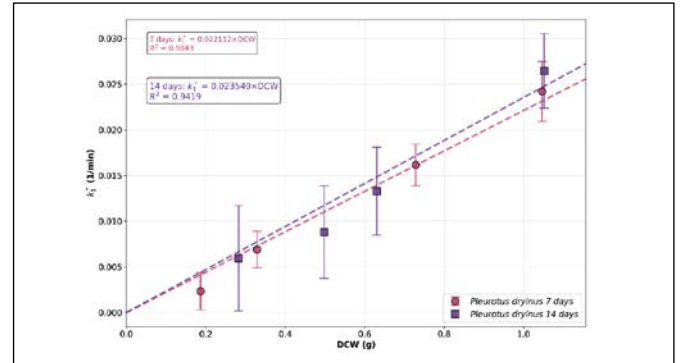


Figure 2: Biomass Calibration for *Pleurotus dryinus* on day 7 and day 14

## 5 Future work

The higher standard deviation observed with the fluorescence-based method may be attributed to the simplicity of the current kinetic model. A more complex model that explicitly accounts for the two-step reaction mechanism of resazurin reduction should be developed in future studies to improve fitting accuracy and result precision. In addition, pellet size distribution analysis of *Pleurotus dryinus* on day 14 (Figure 3) revealed that the majority of pellets ranged between 0.665 mm and 0.775 mm in diameter. Although the fluorescence assay requires lower resazurin concentrations than absorption-based methods, mass transport limitations may still arise as pellet size increases, particularly under fed-batch cultivation conditions. To compensate for potential diffusion barriers within these larger, denser aggregates, optimization of the resazurin concentration may be necessary to ensure accurate measurement of metabolic activity. A comprehensive study is required to fully decouple the interrelated effects of diffusion, biomass density, and metabolic activity to ensure accurate quantification in morphologically complex cultures.

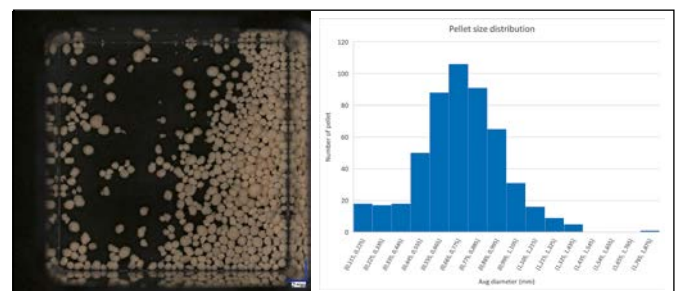


Figure 3: Biomass pellet (left) and pellet size distribution (right) for *Pleurotus dryinus*

---

**References:**

- [1] Sum, Winnie Chemutai; Ebada, Sherif S.; Clement Matasyoh, Josphat; Stadler, Marc (2023): Recent progress in the evaluation of secondary metabolites from Basidiomycota. In *Current Research in Biotechnology* 6, p. 100155. DOI: 10.1016/j.crbiot.2023.100155
- [2] Fazenda, Mariana L.; Seviour, Robert; McNeil, Brian; Harvey, Linda M. (2008): Submerged culture fermentation of “higher fungi”: the macrofungi. In *Advances in applied microbiology* 63, pp. 33-103. DOI: 10.1016/S0065-2164(07)00002-0
- [3] Mehring, A.; Erdmann, N.; Walther, J.; Stiefelmaier, J.; Strieth, D.; Ulber, R. (2021): A simple and low-cost resazurin assay for vitality assessment across species. In *Journal of Biotechnology* 333, pp. 63-66. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2021.04.010

**Project partner:**

Institut für Lebensmittelchemie und Lebensmittelbiotechnologie (LCB), Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU), 35392 Gießen

**Funding provider:**

Project name “Color-UP”



## KONTAKT



**Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberg**

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

[c.lindenberg@oth-aw.de](mailto:c.lindenberg@oth-aw.de)



**Saikrishnan Kandaswamy, M.Sc**

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

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



**Alexander Reinhardt, M.Sc.**

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

[a.reinhardt2@oth-aw.de](mailto:a.reinhardt2@oth-aw.de)



**Minho Kim**

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

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



**Anna Juliane Kuhn**

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

[a.kuhn1@oth-aw.de](mailto:a.kuhn1@oth-aw.de)

# Entwicklung eines abgastoleranten *Scenedesmus obliquus*-Stammes durch adaptive Labor-Evolution

## Zusammenfassung

Mikroalgen besitzen großes Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Fixierung aus industriellen Abgasen, deren Toxizität jedoch eine Herausforderung darstellt. In dieser Studie wurde *Scenedesmus obliquus* mittels adaptiver Laborentwicklung (ALE) so angepasst, dass der Stamm Abgas aus einem Erdgas-Blockheizkraftwerk toleriert. Wachstumsexperimente bestätigten die robuste Leistung des adaptierten Stammes, während der Wildtyp deutliche Hemmung und niedrige EC<sub>50</sub>-Werte zeigte, besonders bei geringen Zelldichten. Eine RNA-Seq-Analyse deutete auf transkriptionelle Stabilität des adaptierten Stammes hin, während der Wildtyp bei Abgasexposition zentrale Stoffwechselwege herunterregulierte. Zudem war die DNA-Reparatur im adaptierten Stamm hochreguliert, möglicherweise als Reaktion auf Formaldehyd im Abgas. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potenzial von ALE für die Entwicklung robuster Algenstämme zur industriellen CO<sub>2</sub>-Verwertung.

## Abstract

Microalgae have strong potential for CO<sub>2</sub> fixation from industrial exhaust gases, but flue gas toxicity remains a challenge. Here, *Scenedesmus obliquus* was adapted via adaptive laboratory evolution (ALE) to tolerate flue gas from a natural gas CHP engine. Growth experiments confirmed robust performance of the adapted strain, whereas the wild type showed strong inhibition and low EC<sub>50</sub> values, especially at low cell densities. RNA-Seq analysis indicated transcriptional stability in the adapted strain, while the wild type broadly downregulated core metabolic pathways. Upregulated DNA repair in the adapted strain suggests enhanced genomic protection, possibly in response to formaldehyde in the exhaust. These results highlight ALE's potential for developing robust algal strains for industrial CO<sub>2</sub> utilization.

## 1 Einleitung

Der ansteigende atmosphärische Kohlendioxidgehalt (CO<sub>2</sub>), der in erheblichem Maße durch anthropogene Emissionen aus Verbrennungsmotoren und Kraftwerken verursacht wird, stellt eine zentrale Herausforderung im Kontext des Klimawandels dar. Unter den zahlreichen untersuchten Minderungsstrategien hat die biologische Fixierung von CO<sub>2</sub> durch Mikroalgen zunehmendes Interesse erlangt, da sie sowohl zur Reduktion von Treibhausgasen als auch zur Produktion von Biomasse beitragen kann. Mikroalgen zeichnen sich durch eine hohe photosynthetische Effizienz aus und sind in der Lage, CO<sub>2</sub> in wertvolle Biomassekomponenten wie Lipide, Proteine und Kohlenhydrate umzuwandeln. Dies macht sie zu attraktiven Kandidaten für die Integration in industrielle

Prozesse, insbesondere zur direkten CO<sub>2</sub>-Fixierung aus Abgasströmen. Dieses Konzept ist jedoch mit mehreren Herausforderungen verbunden. Aus technischer Sicht beeinträchtigen Faktoren wie Selbstverschattung in dichten Kulturen und ein limitierter Stoffübergang die Produktivität in Photobioreaktoren. Auf biologischer Ebene enthalten Abgase neben CO<sub>2</sub> auch weitere Komponenten wie Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe, die toxische Effekte auf Algenzellen haben können. Während mehrere Studien die Toleranz von Mikroalgen gegenüber Abgasen untersucht haben, konzentrierten sich diese zumeist auf simulierte Abgasgemische oder Emissionen aus Kohlekraftwerken [1-4]. Bisher fehlen Untersuchungen zu den Effekten von Emissionen aus erdgasbasierten Blockheizkraftwerken (BHKW). In der vorliegenden Arbeit wurde

das adaptive Potenzial der Grünalge *Scenedesmus obliquus* gegenüber Abgasen eines erdgasbetriebenen BHKW im Rahmen eines kontrollierten Labor-Evolutionsexperiments untersucht.

## 2 Materialien und Methoden

### 2.1 Algenstamm und Kulturmedium

Für alle Experimente wurde die Grünalge *Scenedesmus obliquus* verwendet. Die Kulturen wurden in dem nährstoffreichen Süßwassermedium AF-6 kultiviert. Zur Herstellung des abgasangereicherten Mediums wurden 200 ml AF-6 für 30 Minuten mit Abgas eines erdgasbetriebenen Motors angereichert. Anschließend wurden die Flaschen gasdicht verschlossen und bis zur Verwendung gelagert. Die Zusammensetzung des Motorabgases war unter anderem: 7,3 % CO<sub>2</sub>, 580 ppm CO, 440 ppm NO<sub>x</sub>, 12 ppm SO<sub>2</sub>, 1549 ppm CH<sub>4</sub>, 55 ppm HCHO.

### 2.2 Adaptive Labor-Evolution und Wachstumsverhalten

Erste Expositionsexperimente zeigten, dass das Abgas eine hohe Toxizität für *S. obliquus* aufwies und das Wachstum stark hemmte. Mikroalgen besitzen jedoch eine ausgeprägte Anpassungsfähigkeit aufgrund ihrer kurzen Generationszeiten, hohen Wachstumsraten und großen Populationsgrößen, die eine rasche Selektion toleranter Phänotypen ermöglichen. Um dieses Potenzial zu nutzen, wurde ein Ansatz der adaptiven Labor-Evolution (ALE) angewendet. Drei parallele Kulturreihen wurden unter verschiedenen Abgaskonzentrationen etabliert. Am Ende jeder Wachstumsphase diente die Kultur, die Wachstum bei der höchsten Abgaskonzentration zeigte, als Inokulum für die nächste Serie von drei Kulturen. Dieser Selektions- und Steigerungsprozess wurde über einen Zeitraum von 159 Tagen durchgeführt und führte schließlich zu einem angepassten Stamm mit erhöhter Toleranz gegenüber den Motorabgasen. Zur Analyse des Wachstumsverhaltens wurden Wachstumskurven anhand von OD<sub>750</sub>-Messungen sowie parallelen Zellzählungen für beide Stämme in unbehandeltem Kulturmedium aufgenommen.

### 2.3 Toxizitätstests

Zur Quantifizierung der Toleranz von *S. obliquus*-Stämmen gegenüber Abgasexposition wurden Toxizitätstests sowohl mit dem Wildtyp als auch mit dem adaptierten Stamm durchgeführt. Jeder Stamm wurde bei vier unterschiedlichen Ausgangsbiomassekonzentrationen (OD<sub>750</sub>: 0,5; 1,0; 2,0 und 3,0) getestet und vier verschiedenen Abgaskonzentrationen ausgesetzt. Hierzu wurde ein AF-6-Medium, das mit Motorabgas angereichert worden war, in verschiedenen Verdünnungen eingesetzt (0 %, 10 %, 25 % und 50 %).

Das Ausmaß der Wachstumshemmung im Vergleich zu unbehandelten Kontrollkulturen (0 % Abgas) wurde zur Berechnung der effektiven Konzentration verwendet, die eine 50%ige Wachstumshemmung verursacht (EC<sub>50</sub>). Der prozentuale Hemmungswert (%I) bei einer gegebenen Abgaskonzentration wurde mit nachfolgender Formel berechnet:

$$\%I = \left(1 - \frac{\mu_t}{\mu_c}\right) * 100$$

Dabei bezeichnet  $\mu_t$  die spezifische Wachstumsrate der abgasexponierten Testkultur, während  $\mu_c$  die spezifische Wachstumsrate der unbehandelten Kontrollkultur (0 % Abgas) darstellt. Die spezifische Wachstumsrate ( $\mu$ ) wurde während der exponentiellen Wachstumsphase mit folgender Gleichung bestimmt:

$$\mu = \frac{\ln(c_t) - \ln(c_0)}{t}$$

wobei  $c_t$  die Biomassekonzentration zum Zeitpunkt  $t$ ,  $c_0$  die Ausgangsbiomassekonzentration und  $t$  die Dauer der exponentiellen Wachstumsphase (in Tagen) ist. Die Daten zur Wachstumshemmung bei den verschiedenen Abgaskonzentrationen dienten zur Erstellung von Dosis-Wirkungs-Kurven, aus denen die EC<sub>50</sub>-Werte mittels eines Vier-Parameter-Logistikfits bestimmt wurden.

### 2.4 RNA-Sequenzierung

Um erste Einblicke in die molekularen Grundlagen des Anpassungsphänotyps an Abgasexposition zu gewinnen, wurde eine vorläufige Transkriptomanalyse mittels RNA-Sequenzierung (RNA-Seq) durchgeführt. Die Studie umfasste vier experimentelle Kombinationen (Wildtyp [WT] und adaptierter Stamm [AD], jeweils kultiviert mit und ohne Abgasexposition). Die Gesamt-RNA wurde mit einem spincolumn-basierten Verfahren extrahiert (ROTI® Prep RNA MINI Kit, Carl Roth) und die Sequenzierung erfolgte bei Novogene. Die Analyse differentieller Genexpression wurde mit dem edgeR-Paket und einer festen Dispersionsschätzung durchgeführt. Die für eine Signifikanzanalyse benötigten Replikate sollen in einem Wiederholungsversuch berücksichtigt werden. Zur funktionellen Annotation wurden die Proteinsequenzen mit InterProScan analysiert, um Gene Ontology (GO)-Begriffe unter Verwendung der SUPERFAMILY- und Pfam-Datenbanken zuzuordnen. Zusätzlich wurde BLASTp eingesetzt, um eine homologiebasierte Zuordnung der Proteinsequenzen zum KEGG-Organismus *Chlorella variabilis* durchzuführen und so eine KEGG-Pfad-Anreicherungsanalyse zu ermöglichen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Adaptation und Wachstumsverhalten

Die langfristige Anpassung von *Scenedesmus obliquus* an Motorabgase durch adaptive Labor-Evolution führte erfolgreich zur Etablierung eines Stammes, der in der Lage war, ein stabiles Wachstum in unverdünntem, abgasangereichertem Medium aufrechtzuerhalten. Im Gegensatz dazu zeigte der Wildtyp unter denselben Bedingungen bereits nach 24 Stunden einen vollständigen Kulturzusammenbruch.

Bei Kultivierung im unbehandelten AF-6-Medium wies der adaptierte Stamm eine OD<sub>750</sub>-Wachstumskurve auf, die nahezu identisch mit der des Wildtyps war, was auf eine vergleichbare Gesamtbiomassebildung hinweist. Eine detailliertere Analyse offenbarte jedoch einen konsistenten Unterschied in der Zelldichte bei gleichen optischen Dichten. Für beide Stämme wurde eine lineare Beziehung zwischen OD<sub>750</sub> und Zelldichte festgestellt. Allerdings zeigte die Regressionsgerade des adaptierten Stammes eine geringere Steigung, was auf eine niedrigere Zellzahl pro OD-Einheit hinweist. Der lineare Zusammenhang des adaptierten Stammes zeigte eine sehr hohe Korrelation ( $R^2 = 0,9517$ ), während auch der Wildtyp eine hohe, wenngleich etwas geringere Korrelation aufwies ( $R^2 = 0,9053$ ).

Mikroskopische Untersuchungen belegten zudem morphologische Unterschiede zwischen den beiden Stämmen. Der Wildtyp bildete häufig multizelluläre Coenobien, die typischerweise aus vier oder acht eng verbundenen Zellen bestanden, ein Muster, das auch in späteren Wachstumsphasen beibehalten wurde. Im Gegensatz dazu wuchs der adaptierte Stamm überwiegend als Einzelzellen, wobei Zellaggregate nur selten beobachtet wurden.

#### 3.2 Toxizitätstests und Bestimmung der EC<sub>50</sub>

Die Toxizitätstests zeigten eine ausgeprägte Sensitivität des Wildtyps von *S. obliquus* gegenüber Abgaseinwirkung, insbesondere bei niedrigen initialen Biomassekonzentrationen. Bei Ausgangs-OD<sub>750</sub>-Werten von 0,5, 1,0 und 2,0 wurde bereits bei einer Abgaskonzentration von 10 % eine deutliche Wachstumshemmung festgestellt. Ein vollständiger Kulturkollaps trat bei 25 % bzw. 50 % Abgas für die beiden niedrigsten Anfangs-ODs (0,5 und 1,0) auf. Bei einer OD<sub>750</sub> von 2,0 wurde bei 25 % Abgas lediglich ein geringes Wachstum beobachtet, während die höchste getestete Start-OD (3,0) auch bei 50 % Abgas ein schwaches, jedoch messbares Wachstum zeigte. Allerdings wies auch die Referenzkultur bei OD 3,0 (0 % Abgas) ein langsames Wachstum auf, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Zellen aus einer stationären Phase inokuliert wurden, wodurch ihre Stoffwechselaktivität

und ihr Wachstumspotenzial reduziert gewesen sein dürften.

Im Gegensatz dazu zeigte der adaptierte Stamm unter allen getesteten Bedingungen eine robuste Leistungsfähigkeit. Unabhängig von der Ausgangsbiomassekonzentration und der Abgaskonzentration blieben die Wachstumsprofile nahezu identisch. Selbst bei der höchsten getesteten Konzentration (50 % Abgas) konnte keine signifikante Wachstumshemmung festgestellt werden, was auf eine stark ausgeprägte Resistenz gegenüber den toxischen Komponenten des Motorabgases hinweist (Abbildung 1).

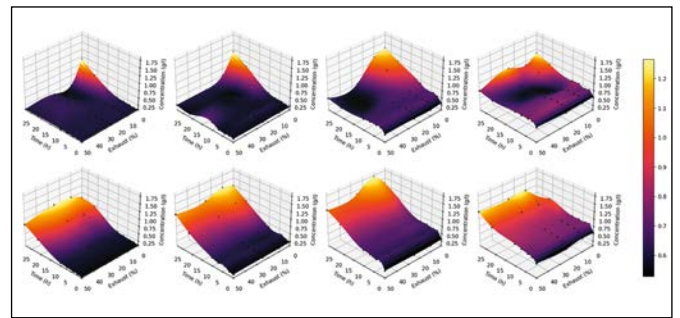


Abbildung 1: Wachstumsverhalten des Wildtyps (WT, oben) und des adaptierten Stammes (AD, unten) bei unterschiedlichen Abgaskonzentrationen und Ausgangszelldichten (von links nach rechts: 0,5; 1,0; 2,0 und 3,0).

Wie erwartet stiegen die EC<sub>50</sub>-Werte des Wildtypen mit zunehmender Start-OD an, was eine höhere Toleranz bei größerer Biomassedichte widerspiegelt, vermutlich aufgrund einer verstärkten Pufferkapazität gegenüber toxischen Komponenten (EC<sub>50</sub>-Werte für die Start-ODs 0,5; 1,0; 2,0 und 3,0 : 1,35 %, 10,67 %, 22,56 % und 43,64 %). Für den adaptierten Stamm konnten keine EC<sub>50</sub>-Werte ermittelt werden, da bei keiner getesteten Abgaskonzentration eine messbare Wachstumshemmung auftrat (Abbildung 2). Dies unterstreicht die Wirksamkeit des Ansatzes der adaptiven Labor-Evolution zur Erzeugung eines abgasresistenten Phänotyps.

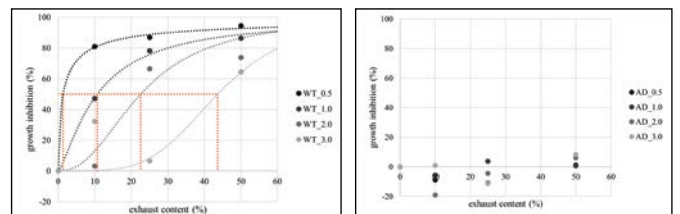


Abbildung 2: Dosis-Wirkungs-Kurven und EC<sub>50</sub>-Werte (rote Linien) für Wildtyp (WT, links) und adaptierten Stamm (AD, rechts) bei unterschiedlichen Start-ODs.

#### 3.3 RNA-Seq

Ein Heatmap-Diagramm der z-score-normalisierten FPKM-Werte (Fragments Per Kilobase of transcript per Million mapped reads) (Abbildung 3) veranschaulicht die globalen Genexpressionsmuster unter den vier experimentel-

len Bedingungen. Für jedes Gen stellt der z-Score die Abweichung vom mittleren Expressionswert über alle Proben dar: Werte über Null kennzeichnen eine überdurchschnittliche Expression, während Werte unter Null eine unterdurchschnittliche Expression anzeigen. Diese Darstellungsweise erlaubt den Vergleich zwischen Proben für jedes einzelne Gen, jedoch nicht zwischen verschiedenen Genen innerhalb einer Probe.

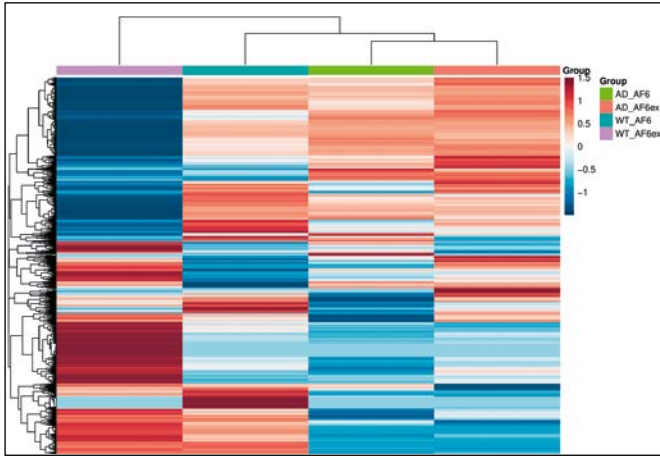


Abbildung 3: Heatmap der Genexpressionen (z-score-normalisierte FPKM-Werte) der vier Testbedingungen.

Der adaptierte Stamm zeigte unter Kontroll- wie auch unter Abgasbedingungen (AD\_AF6 und AD\_AF6ex) hochgradig ähnliche Expressionsprofile, was auf transkriptionelle Stabilität und eine effektive Stresstoleranz hindeutet. Im Gegensatz dazu wies der Wildtyp ausgeprägte Expressionsverschiebungen als Reaktion auf Abgas auf, was auf eine breit angelegte Stressantwort und potenzielle physiologische Beeinträchtigungen schließen lässt. Im adaptierten Stamm wurden Gene, die mit DNA-Erhaltung und -Reparatur assoziiert sind, verstärkt exprimiert. Dies umfasste Signalwege, die an DNA-Replikation, Basenexzisionsreparatur, Nukleotidexzisionsreparatur und Mismatch-Reparatur beteiligt sind. Die beobachtete Aktivie-

rung dieser Signalwege könnte auf eine erhöhte Fähigkeit zur Aufrechterhaltung der genomischen Integrität unter chemisch belastenden Bedingungen hindeuten. Eine plausible Erklärung hierfür ist Formaldehyd, ein Nebenprodukt unvollständiger Methanverbrennung in erdgasbetriebenen Motoren. Als hochreaktives Aldehyd kann Formaldehyd DNA-Protein-Crosslinks, Interstrangvernetzungen sowie Einzel- und Doppelstrangbrüche induzieren [5, 6] – Schädigungen, die ohne Reparatur die Zellviabilität erheblich beeinträchtigen können. Der Wildtyp hingegen zeigte eine starke Herunterregulierung zentraler Stoffwechselwege, was vermutlich eine Verschiebung in einen energiearmen, überlebensorientierten Zustand widerspiegelt. Diese metabolische Suppression beeinträchtigt den Kohlenstofffluss und führt zum Wachstumsstopp, was letztlich unter längerer Exposition zum Zelltod beiträgt.

#### 4 Zusammenfassung

Diese Studie zeigt die erfolgreiche langfristige Anpassung von *Scenedesmus obliquus* an Abgase eines erdgasbetriebenen Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Motors. Der adaptierte Stamm wies ein stabiles Wachstum in einem Medium auf, das mit unverdünnten Abgasen versetzt war, während der Wildtyp (WT) eine hohe Sensitivität zeigte und bereits bei moderaten Abgaskonzentrationen ein vollständiges Wachstumsinhibitions muster aufwies. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potenzial des adaptierten Stammes als robusten Kandidaten für die CO<sub>2</sub>-Fixierung in industriellen Prozessen mit Abgasexposition. Vorläufige transkriptomische Daten deuten darauf hin, dass die langfristige Anpassung eine transkriptionelle Stabilität fördert und schützende DNA-Reparaturmechanismen aktiviert – Merkmale, die vielversprechende molekulare Zielstrukturen für zukünftige Ansätze der Stammmodifikation darstellen.

#### Referenzen:

- [1] A. Aslam, S. R. Thomas-Hall, T. A. Mughal, and P. M. Schenk, “Selection and adaptation of microalgae to growth in 100 % unfiltered coal-fired flue gas”, *Bioresource technology*, vol. 233, pp. 271–283, 2017, doi: 10.1016/j.biortech.2017.02.111.
- [2] D. Cheng et al., “Adaptive evolution and carbon dioxide fixation of *Chlorella* sp. in simulated flue gas”, *The Science of the total environment*, vol. 650, Pt 2, pp. 2931–2938, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.070.
- [3] Y. Jiang, W. Zhang, J. Wang, Y. Chen, S. Shen, and T. Liu, “Utilization of simulated flue gas for cultivation of *Scenedesmus dimorphus*”, *Bioresource technology*, vol. 128, pp. 359–364, 2013, doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.119.
- [4] C.-Y. Kao et al., “Utilization of carbon dioxide in industrial flue gases for the cultivation of microalga *Chlorella* sp”, *Bioresource technology*, vol. 166, pp. 485–493, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.05.094.

- [5] B. Benedict, S. M. Kristensen, and J. P. Duxin, "What are the DNA lesions underlying formaldehyde toxicity?", DNA repair, vol. 138, p. 103667, 2024, doi: 10.1016/j.dnarep.2024.103667.
- [6] N. H. Chen, K. Y. Djoko, F. J. Veyrier, and A. G. McEwan, "Formaldehyde Stress Responses in Bacterial Pathogens", Frontiers in microbiology, vol. 7, p. 257, 2016, doi: 10.3389/fmicb.2016.00257.

## KONTAKT



**Sebastian Linhardt, M.Eng.**

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

s.linhardt1@oth-aw.de



**Sun-Hwa Jung, M.Sc.**

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

s.jung@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Christoph Lindenberger**

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

c.lindenberger@oth-aw.de



**Prof. Dr.-Ing. Marco Taschek**

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

m.taschek@oth-aw.de

# Charakterisierung und Optimierung der Oberflächeneigenschaften von additiv gefertigten 316L-Komponenten durch Laserbehandlung

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundprojekts „AM-Surf“ wird angewandte Forschung betrieben, deren wesentlicher Mehrwert in der langjährigen Erfahrung des Clusters in der Förderung wissenschaftlicher Kooperationen liegt. Der Forschungsschwerpunkt der OTH Amberg-Weiden richtet sich auf das Potenzial der Oberflächenoptimierung von 316L-Bauteilen, hergestellt mittels Laser-Pulver-Bett-Fusion (LPBF)-Verfahren, durch Nachbehandlung der Laserumschmelzens. Dabei werden die chemischen Zusammensetzungen des Pulvers, die mikrostrukturellen Eigenschaften sowie die Oberflächenmorphologie und Korrosionsresistenz der Proben mittels Rasterelektronenmikroskopie und konfokaler Laser-Scanning-Mikroskopie untersucht.

Die Messergebnisse zeigen, dass sich die Oberflächenrauheit durch optimierte Prozessparameter beim Laserumschmelzen signifikant verringern lässt – in Einzelfällen um bis zu einem Faktor zehn. Die Auswertung der potentiodynamischen Polarisationskurven weist auf eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit hin, die durch die geglättete Oberfläche begünstigt wird.

## Abstract

Applied research within the joint project “AM-Surf” is being conducted, whose main strength lies in the cluster’s long-standing experience in fostering scientific collaborations. The research focus of the OTH Amberg-Weiden lies in exploring the potential for surface optimization of 316L stainless steel components produced by laser powder bed fusion (LPBF) through post processing via laser remelting. The main research dedicated to the chemical composition of the 316L powder, the metallographic microstructures, the surface characteristics, and the corrosion resistance of the additively printed 316L specimens. The analyses are carried out using scanning electron microscopy (SEM) and confocal laser scanning microscopy (CLSM).

The measurement results show that surface roughness can be significantly reduced by optimizing the process parameters during laser remelting – in some cases by up to a factor of ten. The evaluation of the potentiodynamic polarization curves indicates increased corrosion resistance, which is enhanced by the smoothed surface.

---

## 1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren zeichnen sich im Vergleich zu subtraktiven Prozessen durch den schichtweisen Aufbau aus, der eine hohe Gestaltungsfreiheit der Geometrien ermöglicht [1]. Ursprünglich als „Rapid Prototyping“ bekannt, hat sich die Technologie über den Prototypenbau hinaus etabliert und findet heute breite Anwendung in Luft- und Raumfahrt, Werkzeugbau, Medizin- und Zahntechnik [2].

Aufgrund seiner hohen mechanischen Festigkeit, guten Schweißbarkeit, geringen Rissneigung und ausgeprägten Korrosionsbeständigkeit gilt 316L-Edelstahl seit Jahrzehnten als bewährter Werkstoff, insbesondere für maritime und andere extreme Umgebungen [3]. In den letzten Jahren hat er sich zudem als besonders geeignet für additive Fertigungsverfahren erwiesen. Dennoch stellt die hohe Oberflächenrauheit additiv gefertigter Bauteile eine Herausforderung dar, die gezielte Nachbehandlungsstrategien erfordert [4].

Laserumschmelzen bietet hier einen vielversprechenden Ansatz zur Verbesserung der Oberflächenqualität. Dabei handelt es sich um ein Verfahren der Lasermaterialbearbeitung, bei dem eine dünne Randschicht aufgeschmolzen wird. Auf diese Weise können nichtmetallische Einschlüsse entfernt, das Gefüge homogenisiert und die mechanischen Eigenschaften optimiert werden, während gleichzeitig eine deutliche Glättung der Oberfläche erzielt wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss dieser Nachbehandlung auf Mikrostruktur, Oberflächeneigenschaften und Korrosionsverhalten von LPBF-gefertigten 316L-Bauteilen systematisch zu untersuchen.

## 2 Experimentelle Vorgehensweise

### 2.1 Materialien und Proben

Als Ausgangsmaterial für die LPBF-Fertigung wurde kugelförmig gasverdüstertes 316L-Metallpulver verwendet. Die chemische Zusammensetzung wurde durch energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) vom Stereoscan 440 Leo von Zeiss bestimmt (Abbildung 1.) und der Wert des jeweiligen Elements ist in der Tabelle 1 dargestellt. REM-Aufnahmen zur Charakterisierung der Partikelmorphologie bei 200- und 1000-facher Vergrößerung sind in Abbildung 2 dargestellt. Das Pulver weist überwiegend kugelförmige Partikel mit einer Größenverteilung von 10 bis 60 µm auf. Die meisten Partikel besitzen glatte Oberflächen ohne sichtbare Risse oder Defekte.

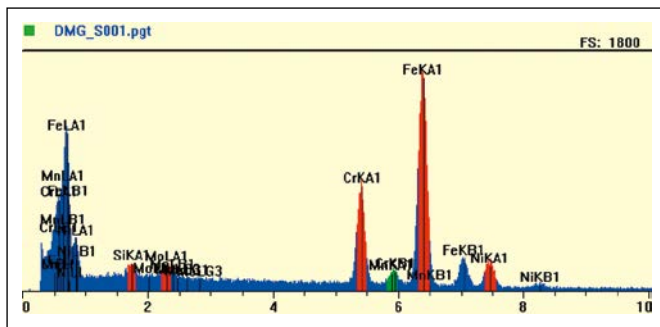


Abbildung 1: Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mithilfe Rasterelektronenmikroskop von 316L-Edelstahl-Pulver.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des 316L-Edelstahl-Pulvers

	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	S	P
<b>316L Pulver (DMG)</b>	57,15	≤ 0,03	18,25	9,47	12,65	2,17	0,31	≤ 0,03	≤ 0,045

Vereinzelt sind jedoch kleinere Satellitenpartikel erkennbar, die an größeren Partikeln anhaften. Solche Satelliten können die Fließeigenschaften des Pulvers beeinträchtigen und in additiven Fertigungsprozessen zu Störungen bei der gleichmäßigen Schichtbildung führen [5].

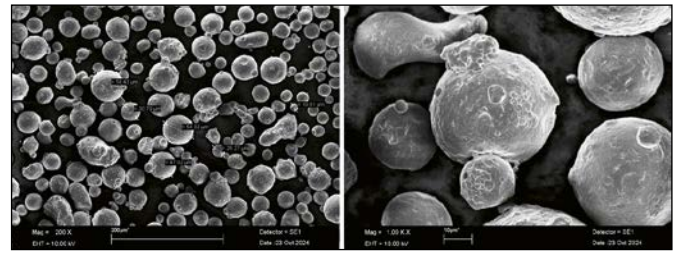


Abbildung 2: Typische Oberflächenmorphologie des frischen 316L-Edelstahl-Pulvers mit jeweils 200-facher und 1000-facher Vergrößerung.

Die LPBF-Bauteile wurden extern von der Forschungsgruppe Additive Fertigung der Technischen Hochschule Deggendorf am Technologie Campus Cham hergestellt. Der schichtweise Aufbau der Probenkörper aus dem digitalen Modell erfolgte auf einer LASERTEC 30 SLM (DMG MORI, DE). Der 3D-Druckprozess wurde entlang der Z-Achse (vertikal) mit Argon als Schutzgas und die Sauerstoffkonzentration unter 0,2 % durchgeführt. Eingesetzte Prozessparameter liegen im für 316L etablierten Bereich: Laserleistung  $P \approx 254 \text{ W}$ , Scangeschwindigkeit  $v = 1000 \text{ mm/s}$ , Scanlinien-Abstand  $h = 50 \text{ µm}$  und eine Schichtdicke  $d = 50 \text{ µm}$  [6]. Zur Reduzierung anisotroper Effekte wurde die Scanrichtung zwischen aufeinanderfolgenden Schichten jeweils um  $67^\circ$  rotiert. Die Grundplatte wurde vor dem Bauprozess auf  $100^\circ \text{ C}$  vorgewärmt, um Spannungen während des Fertigungsprozesses zu minimieren.

### 2.2 Probenvorbereitung

Zur Probenvorbereitung wurden zunächst konventionelle Bearbeitungsschritte wie Absägen, Schleifen und Fräsen durchgeführt. Pulveranhaftungen wurden durch elektrolytischen Abtrag entfernt. Im Anschluss erfolgte die Nachbehandlung durch Laserumschmelzen, die im Mittelpunkt dieser Arbeit steht und gezielt zur Verbesserung der Oberflächenqualität eingesetzt wurde. Die eingesetzte Laserstrahlquelle zur Nachbehandlung ist ein diodengepumpter Faserlaser YLR-150/1500-QCW-MM-AC der Firma IPG. Der Yb:YAG Laser hat eine Wellenlänge von  $1070 \text{ nm}$  und eine maximale Laserleistung von  $279 \text{ W}$  im CW-Betrieb. Die in den Versuchen ermittelten Prozessparameter sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Einstellung des Laserumschmelzens

Scan Parameter	Leistung in % von 250 W	Geschwindigkeit	Überfahrt	Fahrweise	Spurabstand	Fokus
Wert	70	400 mm/s	1	Bi-direktional aus	0,042 mm	Im Fokus

### 2.3 Analyseverfahren

#### Optische Mikroskopie und Metallographie

Die Ausbildung der Mikrostruktur und die resultierenden mechanischen Eigenschaften additiv gefertigter Bauteile sind stark von den thermischen Bedingungen während des Bauprozesses abhängig. Die Proben wurden vor der

mikroskopischen Untersuchung metallographisch präpariert, bestehend aus Schleifen, Polieren und Ätzen. Zur Charakterisierung der inhomogenen Gefügestrukturen wurden optische Aufnahmen mit einer Leica DFC295-Kamera erstellt und anschließend mit der Bildanalyse-Software IMS V17Q4 ausgewertet.

### Konfokale Laserscanning-Mikroskopie

Die dreidimensionale Erfassung der Oberflächenmorphologie erfolgte mithilfe eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops von Olympus LEXT OLS5000. Dieses optische Verfahren ermöglicht eine berührungslose Untersuchung der Probenkörper, um eine Verfälschung von empfindlicher, sehr feiner Schicht zu vermeiden. Die quantitativen Topographiedaten wurden auf ausgewählten Flächen aufgenommen und anschließend ausgewertet. Die flächenbezogene Rauheitskennwerte  $R_a$ ,  $R_z$  und  $S_a$  wurden bestimmt, und die Charakterisierung der Oberflächenstruktur erfolgte ebenfalls auf dieser Basis.

### Korrosionsmessung

316L-Edelstahl weist aufgrund seines hohen Chrom- und Molybdängehalts eine ausgeprägte Beständigkeit gegenüber gleichmäßiger und lokaler Korrosion auf und wird deshalb häufig in aggressiven Umgebungen wie Meerwasser oder in der chemischen Industrie eingesetzt [1]. Dennoch zählt Lochfraßkorrosion zu den kritischsten Schadensmechanismen, da lokal chloridinduzierte Durchbrüche der Oxidschicht sowie prozessbedingte Besonderheiten initiiert werden können. Additiv gefertigte Proben – etwa Schmelzbadgrenzen, Poren oder erhöhte Oberflächenrauheit – können die Lochfraßanfälligkeit zusätzlich verstärken.

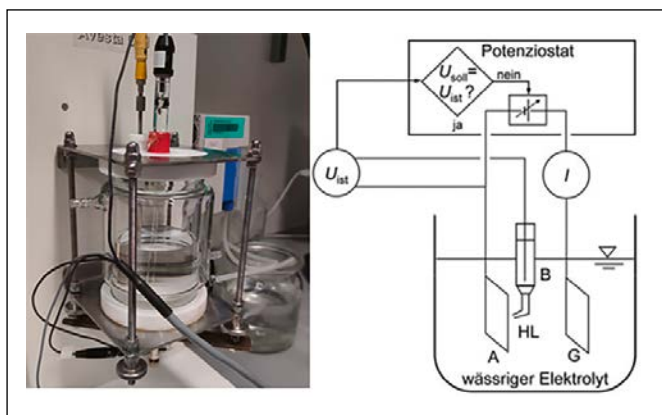


Abbildung 3: Versuchsaufbau der Avesta-Zelle und schematisches Diagramm der potentiostatischen Messmethode für Lochfraßkorrosion.

Zur Analyse der Korrosionsfestigkeit unterschiedlicher Oberflächenqualitäten wurden die Proben zunächst mechanisch poliert. Anschließend erfolgte die elektrochemische Untersuchung mit einer Avesta-Zelle und einem Potenziostaten PGS95 (Bank Elektronik) unter Verwendung der CPC-Software. Die freigelegte Probenoberfläche (Arbeitselektrode) wurde in einer 3 %-NaCl-

Lösung bei Raumtemperatur (20 °C) getestet. Als Referenzelektrode diente  $Ag/AgCl$ , als Gegenelektrode ein Platindraht. Potentiodynamische Polarisationskurven wurden im Bereich von  $-450\text{ mV}$  bis  $+900\text{ mV}$  mit einer Scanrate von  $0,2\text{ mV/s}$  aufgezeichnet. Die Datenerfassung und Auswertung erfolgten mit der CPC-Software.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Oberflächenmorphologie

Bei LPBF 316L entstehen durch die hohen Abkühlraten charakteristische hierarchische Mikrostrukturen, die sich deutlich von konventionell gefertigten Werkstoffen unterscheiden. Die metallographisch präparierten Proben wurden optisch und rasterelektronenmikroskopisch untersucht (Abbildung 4 und 5).

Die Mikrostrukturanalyse der LPBF-316L-Proben zeigt die charakteristische hierarchische Struktur mit ausgeprägten Schmelzbadgrenzen und säulenförmigen Körnern, die sich über mehrere Schichten hinweg erstrecken (Abbildung 4, grüne bzw. blaue Pfeile). Innerhalb der Körner treten zelluläre Strukturen im Submikrometerbereich auf (rote Pfeile), deren Diskontinuität über Schichtgrenzen hinweg durch inhomogenes Ätzverhalten sichtbar wird. Zudem sind linsenförmige Korngrenzenausscheidungen erkennbar (Magenta).

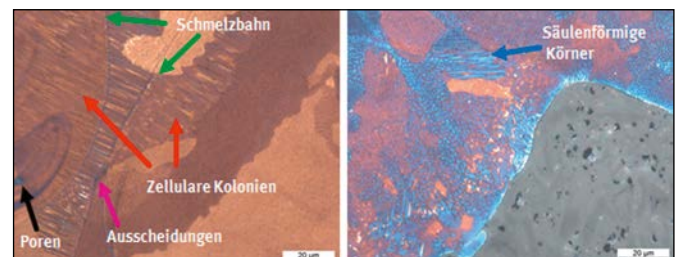


Abbildung 4: Optische Mikroskopie-Bilder der 316L-Proben mit verschiedenen Mikrostrukturen.

Das Gefüge zeigt feine, zelluläre Lamellen, die über Schmelzbadgrenzen hinauswachsen und zur erhöhten Festigkeit beitragen. Kolonien können Längen bis zu  $400\text{ }\mu\text{m}$  erreichen, während einzelne Schmelzbäder eine Höhe von etwa  $50\text{ }\mu\text{m}$  erzielen. Das überwiegend in eine Richtung orientierte Kornwachstum deutet auf eine ausgeprägte Anisotropie hin, deren genauere Analyse durch ergänzende EBSD-Untersuchungen erfolgen sollte. Die REM-Aufnahmen in Abbildung 5 verdeutlichen typische Oberflächenmerkmale von LPBF-316L-Bauteilen.

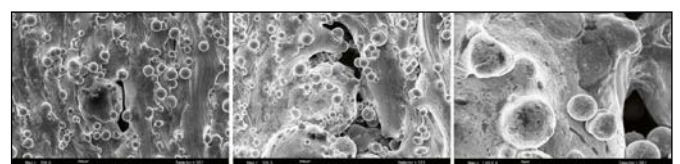


Abbildung 5: REM-Aufnahmen der As-built-Oberfläche von LPBF 316L; Links (200 ×, Maßstab 100 µm), rechts (1000 ×, Maßstab 100 µm).

Redeponierte und teilgeschmolzene Pulverkügelchen entlang der Schmelzbahnen, parallel verlaufende Riefen aus dem Schichtaufbau sowie unregelmäßige Vertiefungen und spaltartige Lack-of-Fusion-Fehlstellen: Solche Pulveranhaftungen und Defekte führen zu einer erhöhten Rauheit, wirken als Kerbstellen und können die Entstehung von Ermüdungsrissen oder Lochfraß initiieren. Nachbehandlungen wie Laserumschmelzen oder -polieren können ein Großteil dieser Defekte entfernen und die Schmelzbahnen deutlich glätten.

### 3.2 Oberflächenrauheit

Die Oberflächen von LPBF gefertigten 316L-Bauteilen weisen aufgrund typischer Prozessartefakte wie Pulveranhaftungen, Balling-Effekten und unvollständiger Schmelzüberlappungen eine hohe Rauheit von etwa  $2\ \mu\text{m}$  bis  $45\ \mu\text{m}$  auf (Abbildung 6a und 6b). Durch Laserumschmelzen wird eine dünne Randschicht erneut aufgeschmolzen, so dass beim Erstarren die Rauheitsspitzen geglättet werden. Dadurch lässt sich die Rauheit deutlich verringern: Literaturwerte zeigen Reduktionen um mehr als 50 % mit Endwerten zwischen  $0,7\ \mu\text{m}$  und  $10\ \mu\text{m}$ , während in eigenen Messungen eine Absenkung von  $9\ \mu\text{m}$  auf  $0,71\ \mu\text{m}$  erzielt wurde (Abbildung 6c und 6d).

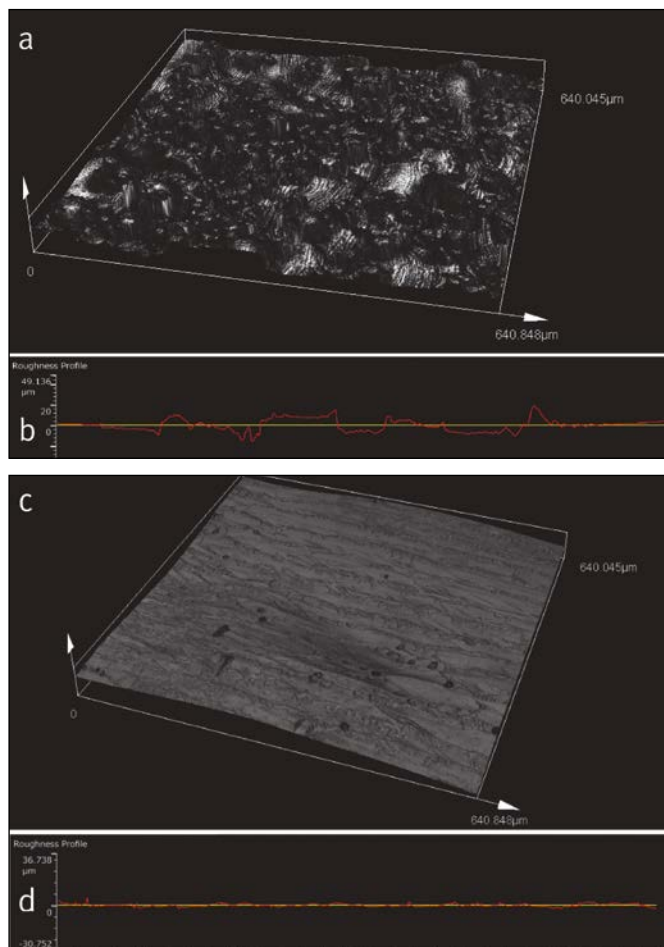


Abbildung 6: Darstellung der Oberflächenmorphologie und Rauheitsprofile von LPBF gefertigten 316L-Proben im Vergleich: (a,b) unbehandelte Oberfläche (As-built-Zustand) vor dem Laserumschmelzen, (c,d) geglättete Oberfläche nach dem Laserumschmelzen.

### 3.3 Korrosionsbeständigkeit

Korrosion bezeichnet die durch Wechselwirkungen mit der Umgebung hervorgerufene Veränderung von Metalloberflächen, die langfristig die Funktionalität des Bauteils beeinträchtigen kann. Neben chemischen und metallphysikalischen Prozessen tritt in wässrigen oder ionenhaltigen Medien vor allem die elektrochemische Korrosion auf. Dabei erfolgt an anodischen Bereichen die Auflösung von Metallatomen, während an kathodischen Zonen Reduktionsreaktionen stattfinden. Elektrolyte mit freien Ionen ermöglichen den Ladungstransport und bilden damit die Grundlage elektrochemischer Messverfahren.

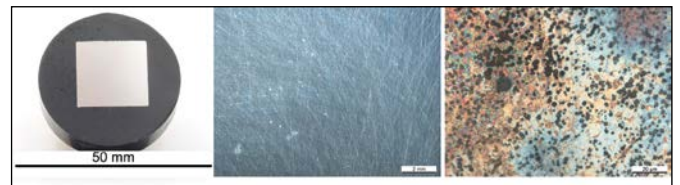


Abbildung 7: Probenpräparation sowie Mikrographien der mechanisch polierten Oberfläche (Mitte) und der Lochfraß (rechts) nach der Korrosionsmessung.

Zur quantitativen Bewertung der Korrosionsbeständigkeit werden potentiostatische bzw. potentiodynamische Messungen eingesetzt. Insbesondere potentiodynamische Polarisationskurven (PPC) erlauben es, das elektrochemische Verhalten eines Werkstoffs systematisch darzustellen. Aus den Stromdichte-Potenzial-Kurven lassen sich charakteristische Kenngrößen ableiten: das Korrosionspotenzial  $E_{\text{corr}}$ , die Korrosionsstromdichte  $i_{\text{corr}}$ , der Passivstrom sowie das Lochfraßpotenzial  $E_{\text{pit}}$ . Diese Parameter liefern unmittelbare Informationen über die Korrosionsrate, das Passivierungsverhalten und die Beständigkeit gegenüber lokalisierten Angriffen. PPC gelten daher als etablierte Standardmethode zur Beurteilung der Korrosionsresistenz von austenitischen Edelmetallen wie 316L.

Die gemessenen Polarisationskinetiken zeigen in unserem Fall eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit der laserpolierten Probe gegenüber der As-built-Probe. Es ist auch an der deutlich niedrigeren Korrosionsstromdichte und dem erhöhten Polarisationswiderstand zu erkennen. Die elektrochemischen Parameter von Proben wurden in Tabelle 3 und 4 zusammengefasst.

Die laserpolierte Probe weist im Vergleich zur As-built-Probe ein etwas edleres Korrosionspotenzial ( $-142,6\ \text{mV}$  vs.  $-150,9\ \text{mV}$ ), eine deutlich niedrigere Korrosionsstromdichte sowie einen rund fünfmal höheren Polarisationswiderstand auf. Dies spricht für eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit infolge reduzierter Rauheit und einer homogeneren Passivschichtbildung. Zwischen der mittleren und der oberen Schicht in Tabelle 4 zeigen sich dagegen nur geringe Unterschiede.

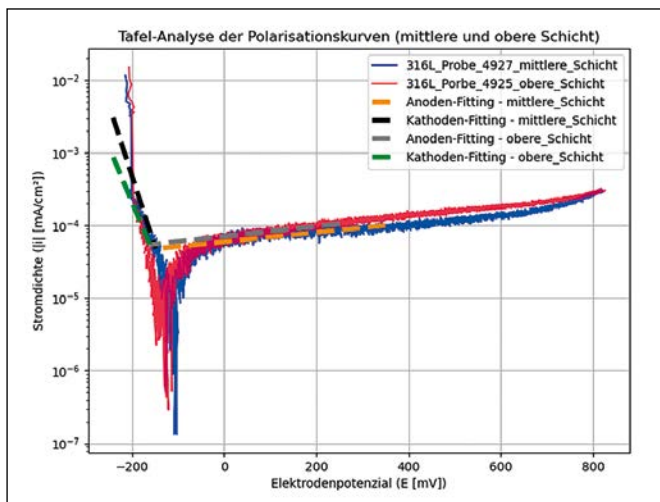
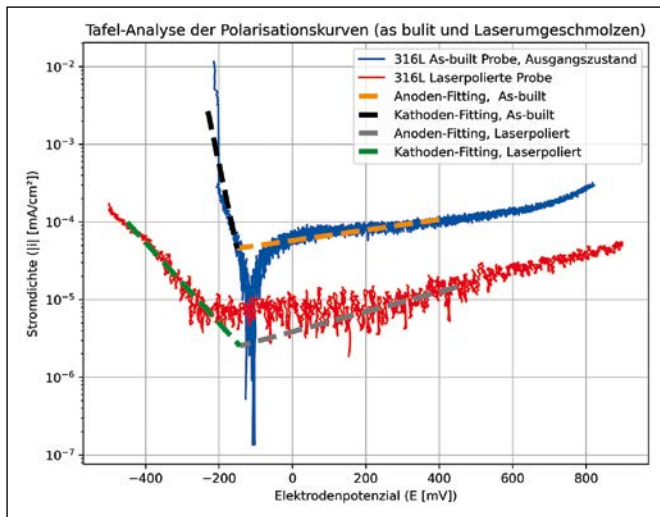


Abbildung 8: Tafel-Analyse von Polarisationskurven von verschiedenen LPBF 316L-Werkstücken.

Tabelle 3: Abgeleitete Korrosionsparameter von As-built- und laserpolierten 316L-Proben

Proben	E <sub>corr</sub> [mV]	I <sub>corr</sub> [mA/cm²]	Anodische Steigung [mV/dec]	Kathodische Steigung [mV/dec]	Polarisationswiderstand [Ω • cm²]
As built	-150,867498	0,000046	0,000674	-0,022291	4,265091 e+07
As built	-150,867498	0,000046	0,000674	-0,022291	4,265091 e+07

Tabelle 4: Abgeleitete Korrosionsparameter von As-built-Proben in verschiedenen Schnitten

Proben	E <sub>corr</sub> [mV]	I <sub>corr</sub> [mA/cm²]	Anodische Steigung [mV/dec]	Kathodische Steigung [mV/dec]	Polarisationswiderstand [Ω • cm²]
Mittlere Schicht	-148,431059	0,000048	0,000674	-0,019596	5,686490 e+07
Obere Schicht	-161,00379	0,000055	0,000701	-0,015168	5,328746 e+08

Die obere Schicht besitzt ein edleres Korrosionspotenzial (-161,0 mV vs. -148,4 mV), jedoch eine leicht erhöhte Korrosionsstromdichte bei nahezu identischem Polarisationswiderstand. Daraus ergibt sich eine insgesamt vergleichbare Korrosionsbeständigkeit, wobei lokale Mikrostrukturen oder Restspannungen Unterschiede verursachen könnten.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die durch LPBF gefertigten 316L-Proben zeigen ein charakteristisches Mikrogefüge mit textur- und richtungsabhängigen Eigenschaften. Die Laserpolitur führt zu einer Verringerung der Korrosionsstromdichte und einem höheren Polarisationswiderstand, was auf eine verbesserte Passivschichtbildung zurückzuführen ist. Die Unterschiede zwischen mittlerer und oberer Schicht sind gering und deuten auf eine insgesamt homogene Korrosionsbeständigkeit hin. Ein direkter Zusammenhang zwischen Oberflächenbehandlung und Korrosionsbeständigkeit konnte bislang nicht eindeutig bestätigt werden. Für eine aussagekräftige Bewertung dieser Korrelation sind weiterführende Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Proben erforderlich.

Für weiterführende Arbeiten ist ein systematischer Vergleich mit konventionell geschmiedetem 316L vorgesehen, insbesondere hinsichtlich des Korrosionsverhaltens vor und nach dem Laserumschmelzen. Ergänzend sollen Gefügeuntersuchungen (EBSD, EDX) entlang der Bauhöhe (Z-Richtung) durchgeführt werden, um mögliche Richtungspräferenzen und deren Zusammenhang mit Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften zu klären.

## Referenzen:

- [1] A. H. Fritz, G. Schulze, Fertigungstechnik, 11. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, 2018.
- [2] K. Pathak et al., 3D printing in biomedicine: advancing personalized care through additive manufacturing, Exploration of Medicine, 4, 2023, 1135-1167.
- [3] T. Voisin et al., Pitting Corrosion in 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review and Perspective, JOM, Vol. 74, No. 4, 2022.
- [4] E. Maleki et al., Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities, Additive Manufacturing, 37, 2021.
- [5] R. F. Vaz et al., The influence of the powder characteristics on 316L-SS feedstock morphology, Coatings, 11(2), 2021.
- [6] S. Rosenthal et al., Speeding up Additive Manufacturing by Means of Forming for Sheet Components with Core Structures, Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology 9 (2022) 1021-1034.

## Projektpartner:

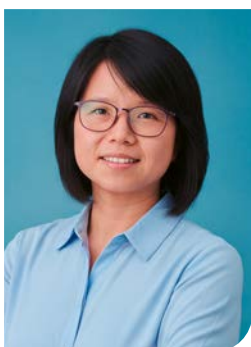
COMTES FHT, CZ-334 41 Dobřany  
Technische Hochschule Deggendorf, Technologie Campus Cham, 93413 Cham

## Fördergeber:

Europäische Union (EFRE), Programm INTERREG Bayern-Tschechische Republik 2021-2027



## KONTAKT



**Dr. Feng Chen**

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

f.chen@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

# Effiziente Methode zur stützstrukturarmen Topologieoptimierung für die additive Fertigung

## Zusammenfassung

In diesem Artikel wird eine effiziente und skalierbare Methode zur Identifizierung lokaler und globaler Überhitzungen während der additiven Fertigung vorgestellt. Bei diesem Fertigungsverfahren besteht nahezu vollständige Designfreiheit. Allerdings müssen Bereiche, die zu Überhitzungen neigen, mittels zusätzlicher Unterstützungsstrukturen an die Bauplattform angebunden werden. Diese dienen zur verbesserten thermischen Leitfähigkeit der Geometrie während des Fertigungsprozesses. Die Information aus der vorgestellten Methode wird gezielt genutzt und in den Algorithmus der Topologieoptimierung implementiert. Daraus ergeben sich Geometrien, bei denen auf Unterstützungsstrukturen verzichtet werden kann. Die aktuelle Implementierung basiert auf homogen strukturierten zweidimensionalen Netzen. Eine Erweiterung für unstrukturierte dreidimensionale Netze ist umsetzbar, was die Anwendung innerhalb verbreiteter Softwarelösungen ermöglicht.

## Abstract

This article presents an efficient and scalable method for identifying local and global overheating during additive manufacturing. This manufacturing process offers nearly complete design freedom. However, regions prone to overheating must be connected to the build platform using additional support structures. These supports serve to improve the thermal conductivity of the geometry during the manufacturing process. The information from the presented method is utilized and integrated into the topology optimization algorithm. As a result, geometries can be generated that do not require support structures. The current implementation is based on homogeneous, structured two-dimensional grids. An extension to unstructured three-dimensional grids is feasible, which would enable application within widely used software solutions.

## 1 Einleitung

Die additive Fertigung bietet gegenüber konventionellen Fertigungsmethoden mit ihrer hohen Designfreiheit einen entscheidenden Vorteil. So können Bauteile gefertigt werden, welche vollständig auf Freiformflächen basieren und z. B. Strukturen besitzen, die in Hohlräumen liegen.

Das laserbasierte Pulverbettverfahren hat allerdings aufgrund seiner hohen thermischen Belastung während des Prozesses eine entscheidende Fertigungseinschränkung. Eine gute Wärmeleitfähigkeit muss gegeben sein. Abbildung 1 zeigt den lageweisen Aufbau eines Bauteils. Die Geometrie auf der linken Seite besitzt einen Winkel  $\alpha$ , welcher kleiner als der kritische Überhang-

winkel  $\alpha_{oh}$  ist. Eine Fertigung ist damit möglich. Die rechte Geometrie verletzt die Empfehlung des Überhangwinkels, weswegen Stützstrukturen (hier als graue Säulen dargestellt) in die Struktur implementiert werden

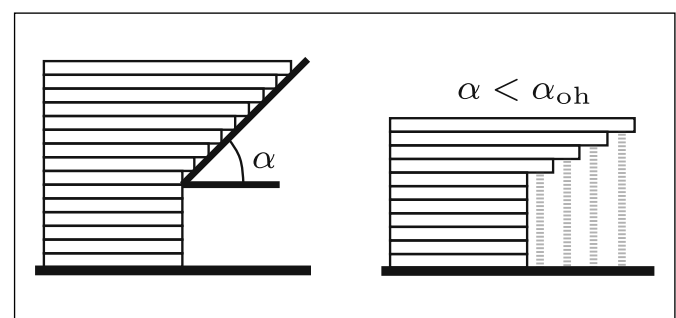


Abbildung 1: Additiver Fertigungsprozess [1]

müssen. Diese werden nach dem erfolgreichen Prozess entfernt. [1]

## 2 Methodisches Vorgehen

### 2.1 Aktuelle Lösungen

#### 2.1.1 Filtermaske

Verschiedene Algorithmen zur Identifizierung von Strukturen, welche den kritischen Überhangwinkel betrachten, kommen bereits zum Einsatz. Weit verbreitet ist der Ansatz über eine Filtermaske. Aufbauend auf der Grundplattform werden die darüberliegenden Elemente auf diskrete Weise bewertet. Wenn ein kritischer Überhangwinkel  $\alpha = 45^\circ$  definiert wird, lässt sich ein Element im dreidimensionalen Fall für homogene, strukturierte Netze von fünf darunterliegenden unterstützen. Dieses Schema wird in Abbildung 2 dargestellt, wodurch bereits Nachteile erkennbar werden. Eine Übertragbarkeit auf unstrukturierte Netze erweist sich als schwierig. Außerdem wird dieser Filter Elementlage für Elementlage erstellt, was dem additiven Fertigungsprozesse, ähnelt. Somit ist der Algorithmus nicht parallel ausführbar, da jede Lage entsprechend von der darunter liegenden abhängt. Aus diesem Grund ist dieses Vorgehen auf eine große Anzahl von Elementen nicht anwendbar.[2]

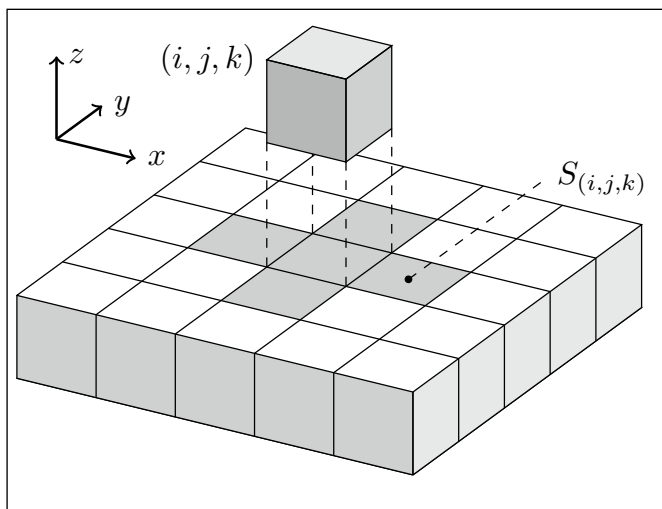


Abbildung 2: 3D-Filtermaske für die additive Fertigung bei homogenen strukturierten Netzen vgl. [2]

#### 2.1.2 Wellenfront in Form einer Differentialgleichung

Mit der Simulation einer Wellenfront durch das solide Material wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher auf Differentialgleichungen basiert. Mit bestehenden Gleichungslösern kann die Lösung dieses Filters auch parallel ausgeführt werden. Abbildung 3 zeigt das beschriebene Vorgehen für eine anisotrope Geschwindigkeitsfunktion, um daraus resultierend ein Verzögerungsfeld zu erhalten. Daraus lassen sich abschließend die Bereiche ermitteln, welche den Überhangwinkel  $\alpha$  nicht verletzen. [1]

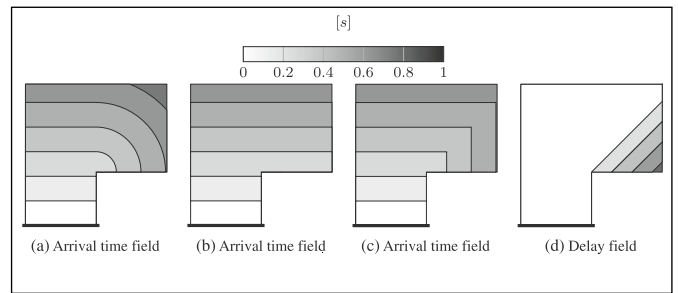


Abbildung 3: Bestimmung des Überhangwinkels  $\alpha$  mithilfe einer Wellenfront [1]

#### 2.1.3 Nachbildung des Fertigungsprozesses

Ein weiterer Ansatz verfolgt die numerische, thermische Nachbildung des additiven Fertigungsprozesses. Unterschiedliche Vereinfachungen dieses Prozesses wurden untersucht. Abbildung 4 zeigt dazu zwei verschiedene Approximationen des Fertigungsprozesses anhand eines Bauteils. Links wird der prozessnahe Ansatz beschrieben, der mithilfe von stationären, thermischen Simulationen abgebildet wird. Es ist erkennbar, dass sich mit zunehmender Bauteilhöhe die Anzahl der Freiheitsgrade stark erhöht. Dies führt zu einer ressourcenintensiven Berechnung des thermischen Profils. Auf der rechten Seite wird nicht die vollständige Bauteilhöhe abgebildet. Stattdessen wird eine Maske mit der Höhe  $L_s$  definiert und schrittweise durch das vollständige Bauteil bewegt. Die Anzahl der Subprobleme ist weiterhin hoch, jedoch bleibt die Anzahl der Freiheitsgrade pro Subproblem annähernd konstant. Letztlich basieren beide Algorithmen zwar auf Differentialgleichungen, jedoch muss hierzu eine Vielzahl von Subproblemen gelöst werden. Die Information aus der Überhitzungsanalyse wird anschließend in die Topologieoptimierung eingebracht. Ein weiterer Nachteil dieses Vorgehens ist die nicht triviale Übertragbarkeit auf unstrukturierte Netze (z. B. Tetraeder). [3][4]

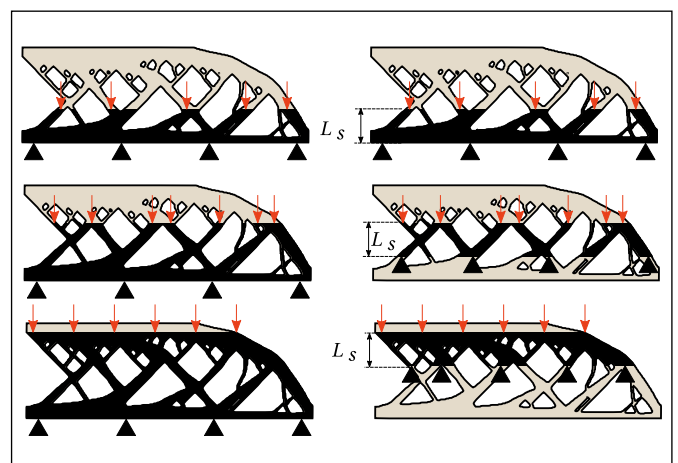


Abbildung 4: 2D-Beispiel für Modellierung stationärer thermischer Simulationen für die additive Fertigung (links: prozessnah, rechts: konstante Dicke  $L_s$  der Maske), vgl. [4]

## 2.2 Normiertes Temperaturfeld – ein neuartiger Ansatz

### 2.2.1 Algorithmus

Diese neuartige Methode vereint die Vorteile einer Differentialgleichung mit bestehenden Elementtypen und Gleichungslösern. Des Weiteren ist die Bewertung des Fertigungsprozesses bzw. der Restriktion auf Basis einer einzelnen Simulation pro Iteration der Topologieoptimierung möglich.

Im ersten Schritt wird eine stationäre, thermische Analyse des Designraums durchgeführt. Das resultierende Temperaturfeld  $\vartheta_{ini}$  entspricht dabei der Referenz. Der Wärmestrom pro Knoten wird anhand der Elementdichte  $\varrho$  bestimmt. In diesem Fall besitzen alle Elemente eine Dichte von  $\varrho = 1$ . Daraus resultiert ein Wärmestrom  $q = 1$  für jeden Knoten (ausgenommen der Knoten entlang des Randes). Die Grundplatte wird hierfür als Kühlkörper definiert. Es handelt sich dabei um ein nicht physikalisches Temperaturprofil, da die Belastung lediglich eine Annäherung an den Fertigungsprozess darstellt. Bei allen Iterationen der Topologieoptimierung wird das Temperaturfeld  $\vartheta_i$  bestimmt, wobei  $i$  der Iteration entspricht. Wie bereits beschrieben, ist die thermische Belastung  $q(\varrho)$  eine Funktion der Elementdichte. Anschließend wird ein neues, dimensionsloses Feld ermittelt und eine Obergrenze  $\vartheta_{crit}$  wie folgt definiert:

$$\frac{\vartheta_i}{\vartheta_{ini}} \leq \vartheta_{crit}$$

Abbildung 5 a) zeigt das Modell für eine freie, zweidimensionale Topologieoptimierung eines Kragarms mit dem Designraum  $\Omega$ . Das Zielvolumen wird mit  $V = 50\%$  definiert und ein Filterradius  $r = 6$  gewählt. Das Ergebnis der Topologieoptimierung zur Reduzierung der Nachgiebigkeit mit einer Anzahl von  $100 \times 50$  Elementen wird in b) dargestellt. Der Vektor  $b$  zeigt die Richtung der additiven Fertigung, und dessen Ursprung weist auf die Position des Kühlkörpers bzw. der Grundplatte hin. Anhand dieser Geometrie soll der beschriebene Ansatz verifiziert werden. Die Falschfarbendarstellungen in c) und d) zeigen die Temperaturverläufe für  $\vartheta_{ini}$  und  $\vartheta_i$ , wobei  $i$  der letzten Iteration in der Topologieoptimierung entspricht. Der Farbverlauf e) entspricht dem Quotienten aus dem initialen Temperaturprofil und dem der letzten Iteration. Es wird sichtbar, welche Bereiche zur Überhitzung neigen und aus diesem Grund mit Stützstrukturen gefertigt werden müssen. Die rote Begrenzungslinie hebt diese Bereiche hervor. Diese Information kann aber auch gezielt während der Topologieoptimierung genutzt werden, um das Ergebnis in eine gewünschte Richtung zu lenken.

Um eine differenzierbare Maximalbedingung für die thermische Ungleichung zu erhalten, wird auf eine P-Mean-Agglomeration zurückgegriffen. Die Sensitivitäten,

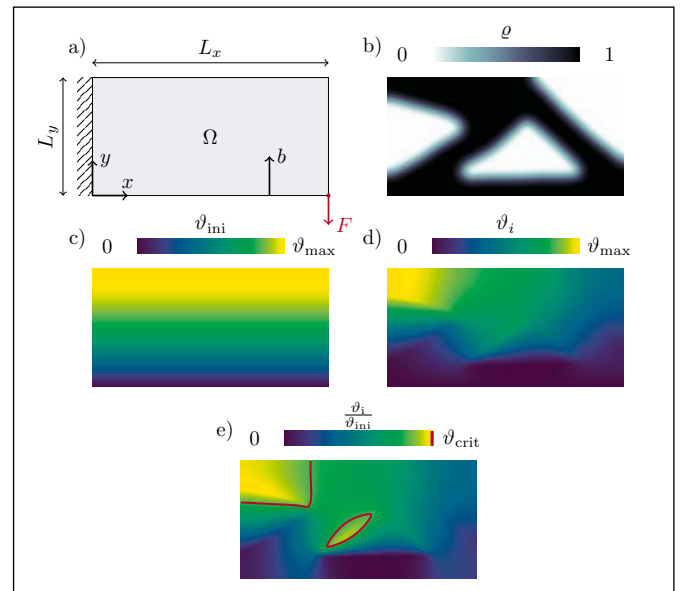


Abbildung 5: Freie Topologieoptimierung eines Kragarms: a) Modell, b) Ergebnis, c) Initiales Temperaturfeld, d) Temperaturfeld der Iteration  $i$ , e) Dimensionsloses Feld zur Bewertung der Überhitzung mit  $\vartheta_{crit} = 1.2$

die für die Optimierung notwendig sind, werden anhand der Adjoint-Methode hergeleitet. Des Weiteren wird für die Optimierung die robuste Formulierung verwendet, um das Ausbilden von Elementen mit mittlerer Elementdichte zu reduzieren. Damit resultiert mit steigender Iterationszahl ein immer schärferes Abbild der Geometrie.

Der Algorithmus wird in der Python-Umgebung entwickelt. Das Lösen der linearen Gleichungssysteme kann mittels der PyPardiso Bibliothek parallel ausgeführt werden. Damit ist eine sehr gute Skalierbarkeit gegeben. Des Weiteren spricht für die weitere Entwicklung die Open-Source-Natur dieser Programmiersprache, wodurch viele Bibliotheken frei verfügbar sind.

### 2.2.2 Beispiele zur Verifikation des Algorithmus

Abbildung 6 zeigt zwei Beispiele, die zur Verifizierung des Algorithmus verwendet werden. Auf der linken Seite handelt es sich um ein Zwei-Stab-Problem mit einem rechteckigen Designraum mit der Höhe  $L_y$  und der Länge  $L_x = 2L_y$ . Die Kraft  $F_y = -1$  wird bei  $(L_x, 0)$  definiert. Die Randbedingung bei  $x = 0$  entspricht einer Festeinspannung. Eine Volumenreduktion von  $85\%$  soll erzielt werden, mit einem Filterradius von  $r_{min} = 3$ . Die Baurichtung ist mit dem Vektor  $b$  definiert.

Die Ergebnisse für zunehmende kritische Winkel  $\alpha$  sind in Abbildung 7 oben dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass der Algorithmus die Lösung entsprechend dem kritischen Winkel anpasst.

Das zweite Beispiel beschreibt ein modifiziertes MBB-Problem mit der Größe  $L_x = L_y$ . Die Symmetriebedingung bei  $x = 0$  wird genutzt, um Ressourcen zu sparen. Die

Kraft  $F_y = -1$  greift an der Position  $(0, L_y)$  an. Der  $y$  Freiheitsgrad bei  $(L_x, L_y)$  wird ebenso eliminiert. Auch hier wird die Baurichtung in  $y$ -Richtung mit  $b$  bezeichnet.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 in der zweiten Reihe für verschiedene Algorithmen abgebildet. Die Reihenfolge entspricht einer freien Topologieoptimierung, einer Optimierung mittels Filtermaske, einer Optimierung mithilfe der Überhitzungsanalyse, die den Fertigungsprozess nachbilden soll, und letztlich der neuen vorgestellten Methode. Es sind deutliche Unterschiede in den Strukturen zu erkennen. Die vorgestellte Methode bildet im Gegensatz zu den anderen Lösungen ein sehr starkes Fundament aus, mit immer dünner werdenden Versteifungen. Ein kleiner Bereich verletzt weiterhin den definierten Überhangwinkel, jedoch sollten weitere Vorteile dieser Geometrie evaluiert werden. Es wird von geringen Spannungen nach dem Entfernen des Bauteils von der Grundplattform ausgegangen.

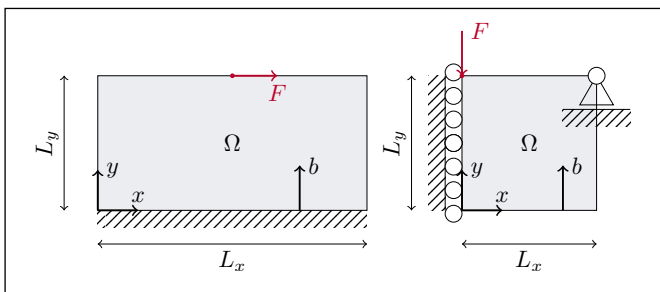


Abbildung 6: Beispiele zur Verifizierung des Algorithmus; links: Zwei-Stab-Problem, rechts: modifiziertes MBB-Problem (symmetrisches Modell)

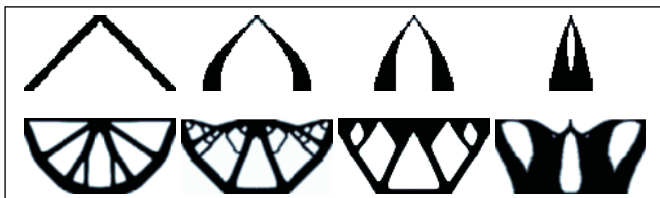


Abbildung 7: Ergebnisse der Topologieoptimierung; oben: Zwei-Stab-Problem mit abnehmendem Wert der Obergrenze  $\vartheta_{crit}$  (links nach rechts); unten – MBB: freie Topologieoptimierung, Filtermaske, Überhitzungsanalyse, vorgestellte Methode

### 2.2.3 Erweiterung für den dreidimensionalen Fall

Strukturen mit ca. 500.000 Tetraeder Elementen wurden beispielhaft in Abaqus/Standard untersucht, um die thermische Bewertung im dreidimensionalen Fall zu analysieren. Abbildung 8 zeigt dazu in der ersten Reihe die definierten Bauräume und die Berechnung des

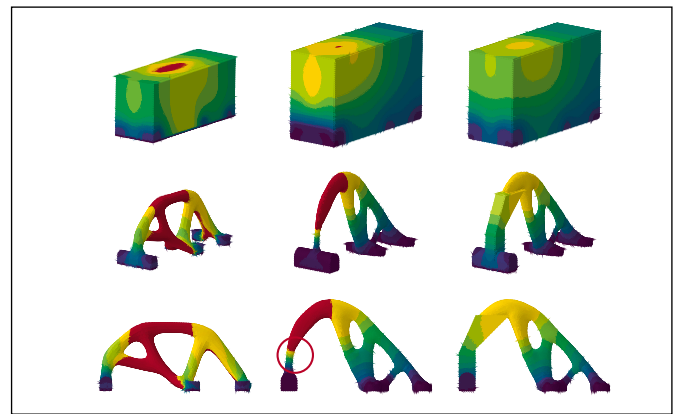


Abbildung 8: 3D-Beispiel des dimensionslosen Felds zur Identifizierung von Überhitzungen mit  $\vartheta_{crit} = 1.2$

Quotienten aus dem initialen Temperaturfeld und der tatsächlichen Geometrie. Die zweite und dritte Reihe beschreibt die Ergebnisse für die isolierte Geometrie in der isometrischen und der seitlichen Darstellung. Die erste Struktur weist offensichtlich Bereiche auf, die den Maximalwert von  $\vartheta_{crit}$  überschreiten, da der kritische Überhangwinkel unterschritten wird. Die zweite Geometrie scheint additiv gerecht konstruiert zu sein. Jedoch bildet sich aufgrund des filigranen linken unteren Bereichs (rot markiert) ein thermischer Flaschenhals. Um diesem Effekt entgegenzuwirken wird eine Verstärkung dieses Bereichs untersucht. Dies ist in der dritten Spalte abgebildet. Damit wird offensichtlich, dass dieses Verfahren nicht nur lokale Überhitzungen identifiziert, sondern ebenso auf globaler Ebene thermische Pfade bewertet.

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Topologieoptimierung für eine stützstrukturarme additive Fertigung auf Basis einer Differentialgleichung ermöglicht Ergebnisse mit hoher Auflösung. Das wird durch die gute Skalierbarkeit von Differentialgleichungen gegenüber Filtermasken erzielt. Die Einfachheit einer stationären, thermischen Simulation in Verbindung mit der vorgestellten Methode ermöglicht die Identifizierung von Überhitzungen auf Geometrieebene. Diese erlangte Information kann gezielt in die Optimierung zurückgeführt und als Restriktion implementiert werden. Mithilfe der gezeigten Methode ist eine Topologieoptimierung für stützstrukturarme Designs möglich. Die aktuelle Implementierung innerhalb von Python kann mithilfe von Standard-Bibliotheken durchgeführt werden. Eine Erweiterung, um dreidimensionale Probleme zu lösen, wird angestrebt.

## Referenzen:

- [1] E. van de Ven, R. Maas, C. Ayas, M. Langelaar, and F. van Keulen, "Continuous front propagation-based overhang control for topology optimization with additive manufacturing", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 57, no. 5, pp. 2075-2091, May 2018.
- [2] M. Langelaar, "Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, vol. 12, pp. 60-70, 2016.
- [3] G. Haveroth et al., *Topology optimization including a model of the layer-by-layer additive manufacturing process*, vol. 398. 2022.
- [4] R. Ranjan, "Efficient Thermal Modelling and Topology Optimization for Additive Manufacturing", Delft University of Technology, 2023.

## Fördergeber:

Die Europäische Union fördert das Projekt AM-Surf im Rahmen des Interreg Bayern-Tschechien Programms unter dem Förderkennzeichen BYCZ01-032.



## KONTAKT



**Patrick Biehler, M.Eng.**

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

p.biehler@oth-aw.de



**Prof. Dr. Jakub Rosenthal**

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

j.rosenthal@oth-aw.de

**PROMOVIEREN AN DER OTH AMBERG-WEIDEN**

Ihr direkter Weg zur erfolgreichen Promotion –  
in unseren **PROMOTIONSZENTREN**:

**REDIG - Ressourceneffizienz und Digitalisierung**

Interdisziplinäre Forschung zu Ressourcenmanagement,  
Digitalisierung, Wirtschaft & Gesellschaft 4.0 und Data  
Science – in Kooperation mit den Hochschulen Ansbach  
und Hof.

**DIWAG - Digitale Innovationen für die sich  
wandelnde Gesellschaft**

Forschung zu digitalen Innovationen und gesellschaftlichem  
Wandel – mit den Hochschulen Neu-Ulm und Landshut.

**Ihre Vorteile**

- Promotion an einer forschungsstarken Hochschule
- Enge wissenschaftliche Betreuung
- Interdisziplinäre Forschung mit Praxisbezug
- Starke regionale und überregionale Vernetzung

Gestalten Sie Ihre wissenschaftliche Zukunft –  
an der OTH Amberg-Weiden!



MEHR ERFAHREN UNTER:  
[WWW.OTH-AW.DE/PROMOTION](http://WWW.OTH-AW.DE/PROMOTION)

novem

**DEINE  
KARRIERE  
BEI NOVEM**

#GEMEINSAMNEUESBEWEGEN

JETZT MEHR ERFAHREN

**HT GROUP**

Komm zu uns und starte in eine  
tolle Zukunft mit vielen Perspektiven.

Rambacher Str. 2 • 91180 Heideck  
info@htgroup.de • T +49 (0) 9177 98-0  
[www.htgroup.de](http://www.htgroup.de)

GESUNDHEIT PFLERGE FORSCHUNG

**JETZT  
WEITER-  
BILDEN!**

Berufsbegleitende Weiterbildung  
auf Hochschulniveau

Studium // Kurse // Zertifikate



[oth-professional.de](http://oth-professional.de)

# Konzeption und Realisierung eines thermisch aktivierten Greifsystems mittels 4D-Druck

## Zusammenfassung

Ziel war es, ein leichtes, kompaktes Greifsystem zu entwickeln, das durch thermisch induzierte Formänderung ohne externe Aktoren eine Greifaufgabe bewältigen kann und bis auf den Einsatz von Normteilen vollständig 3D-druckbar ist. Dazu wurden Greiffinger auf Basis der Timoshenko-Bimetall-Formel konzipiert, die sich unter Wärmeinfluss verformen und aus einer Kombination gängiger FFF-Druck-Materialien (Fused Filament Fabrication) mit TPU (thermoplastisches Polyurethan) bestehen. In Versuchen wurde die Kompatibilität der Materialkombinationen ebenso wie das Formänderungs- und Rückstellverhalten erprobt. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein weiteres Konzept ausgearbeitet, das zur Maximierung des Krümmungsverhaltens der Greiffinger mit zeitgleicher Temperaturerhöhung und -senkung arbeitet. Um dieses Betriebsverhalten theoretisch herzuleiten, wurde die Laminat-Methode verwendet. Dazu werden Greiffinger, versehen mit zwei internen Luftkanälen, simultan jeweils mit temperierter kalter oder warmer Luft durchströmt, um so eine Temperaturänderung umzusetzen.

Finale Versuchsreihen umfassten systematische Funktionstests sowie Messungen von Maximallast, Bewegungsraum und Reaktionszeit. Das Ergebnis lässt eine Korrelation zwischen diesen grundlegenden Betriebsgrößen und der Länge der eingesetzten Finger-Varianten erkennen. Die Griffkraft und die maximale Traglast nehmen bei größerer Länge ab. Ferner bestätigen die Ergebnisse die prinzipielle Funktionsfähigkeit und bieten Aufschlüsse über das Potenzial von thermisch aktiven Greifsystemen in den Bereichen Low-Cost-Automation, Leichtbau und Softrobotik. Daneben konnte gezeigt werden, dass sich bei 3D-gedruckten Bauteilen der Einsatz einer industriellen Computertomografie, mit deren Hilfe sowohl die Fertigungstoleranzen und Infillstrukturen geprüft, als auch Lunker und Fehlstellen im Inneren des Bauteils erkannt werden können, zur effektiven Qualitätssicherung empfiehlt.

## Abstract

The development was focused on a lightweight and compact gripper system, that can perform a grasping task through thermally induced shape change without the use of external actuators. All components, beside of standard parts, should be 3D-printable. For this purpose, the fingers of the system which change their form influenced by an alteration of the temperature and consists out of a combination of common use FFF (Fused Filament Fabrication) printing materials with TPU (thermoplastic polyurethane), were designed based on the Timoshenko bimetal formula. The compatibility of different material combinations, as well as the bending and restoring behaviour, was tested in experiments.

Based on the insights gained, from these tests, a further concept was developed, employing simultaneous heating and cooling to maximize the bending behaviour of the actuators. In order to theoretically describe this operating behaviour, the laminate approach was employed. For this purpose, gripper fingers equipped with two internal air channels were subjected to temperature-controlled air-flow to trigger thermal variation. Finally, measurements of maximum load, range of motion and response time, as well as systematic functional tests were carried out. The results indicate a correlation between these fundamental operating parameters and the length of the finger variants used. While the increasing of the finger length improves the response time and the stroke path, parameters such as gripping force and maximum load capacity decrease. Furthermore, the results confirm the fundamental functionality of the concept and provides a deeper understanding to the potential of thermally activated gripping systems for applications in low-cost automation, lightweight design, and soft robotics. For an effective quality assurance of 3D-printed components, the use of industrial computer tomography is recommended. The manufacturing tolerances and infill structures can be checked, as well as cavities and defects inside of the component can be detected.

## 1 Einleitung

Der 3D-Druck bietet heutzutage die Möglichkeit, Konstruktionen nicht nur in digitaler Form darzustellen, sondern diese, im privaten oder industriellen Bereich, direkt physisch zu realisieren. Das Verfahren hat sich in den vergangenen Jahren von einer reinen Rapid-Prototyping-Technologie hin zu einem wichtigen Werkzeug für die industrielle Fertigung entwickelt [1, pp.5-6]. Neben der additiven Herstellung komplexer Geometrien rückt zunehmend auch die Erweiterung um zusätzliche Funktionalitäten in den Fokus. Ein innovativer Ansatz in diesem Zusammenhang ist der sogenannte 4D-Druck. Dabei werden Bauteile so ausgelegt, dass sie sich nach der Herstellung durch äußere Einflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit oder magnetische Felder gezielt verändern und damit die vierte Dimension erreicht wird [2]. Auf diese Weise

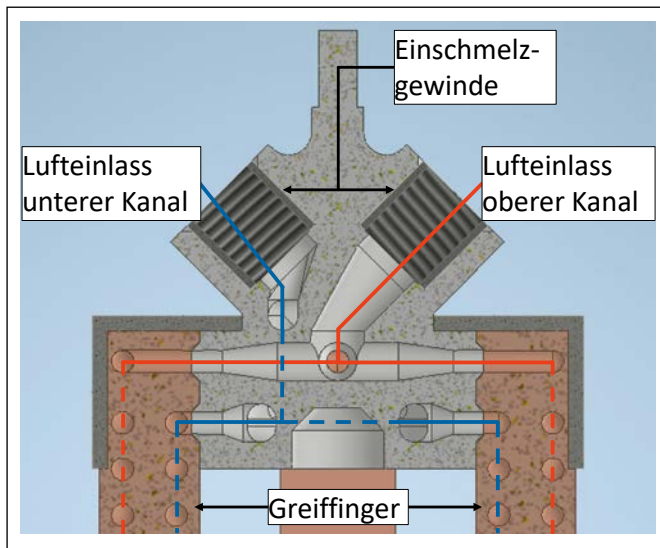


Abbildung 1: Schnittdarstellung durch die Greiferbasis

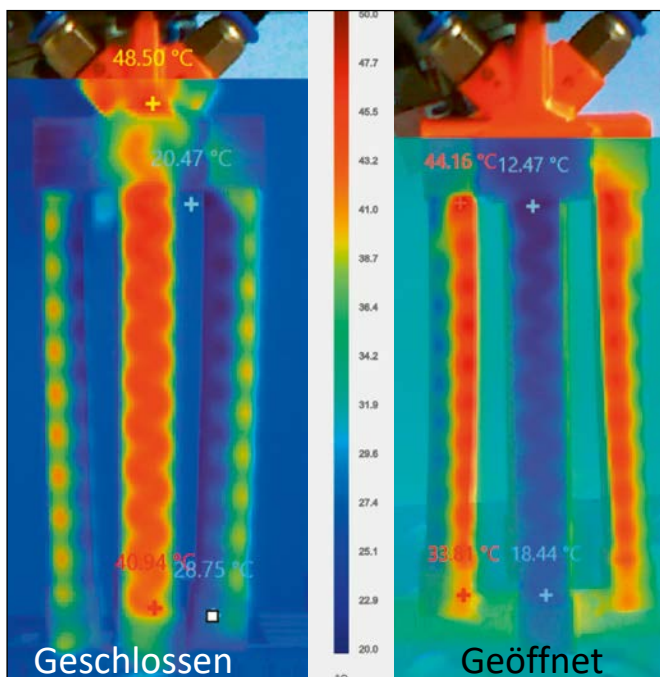


Abbildung 2: Wärmebildaufnahmen des Greifsystems während des Betriebs

können beispielsweise Bewegungen oder Formänderungen realisiert werden, ohne dass klassische Aktuatoren erforderlich sind. Ziel war nun die Entwicklung eines thermisch angetriebenen Greifsystems, das seine Bewegung ausschließlich durch thermisch induzierte Formänderung erzeugt.

## 2 Vorstellung des thermisch aktivierten Greifsystems

Bei dem entwickelten Greifsystem handelt es sich um einen Fingergreifer, bestehend aus einer Basis und vier Fingern. Die Basis dient der Verteilung der jeweiligen warmen und kalten Luft und verfügt somit über zwei Luftinlässe, welche die Greiffinger über den unteren und oberen Kanal versorgen. Die Temperierung der Luft erfolgt außerhalb des Systems unter Verwendung eines Wirbelrohres, welches aus Druckluft sowohl kalte als auch heiße Luft liefert. Zur Steuerung des Greifers wurden zwei manuelle 3/2-Wegeventile vor den Luftinlässen montiert, über die die Druckluftversorgung umgeschaltet wird. Um die Schließung des Greifsystems einzuleiten, wird die Außenseite der Finger erhitzt und die Innenseite gekühlt. Für die Öffnung des Systems wird dies umgekehrt.

### 2.1 Theoretische Herleitung des Wirkprinzips

Zur Realisierung der Greifbewegung wurden in einem MMP (Multi-Material-Print) mittels FFF-Druck Greiffinger angefertigt, die aus zwei TPU-Schichten bestehen und von einer PET-G-Schicht getrennt sind. Das additive Fertigungsverfahren ermöglicht Kanäle innerhalb der TPU-Schichten sowie den Materialwechsel während des Fertigungsprozesses. Somit werden zwei Materialien mit unterschiedlichem CTE-Wert (Wärmeausdehnungskoeffizient) stoffschlüssig miteinander verbunden, um eine Krümmung infolge asymmetrischer thermischer Ausdehnung zu ermöglichen.

### 2.2 Ermittlung der Kompatibilität gängiger FFF-Materialien für den Anwendungsfall der asymmetrischen thermischen Ausdehnung

Um die Kompatibilität der Materialien zu untersuchen, wurden zunächst Proben angefertigt, anhand derer die Materialpaarungen zwischen TPU und ASA, PET-G, PLA sowie PA12 untersucht wurden. Hierbei dient TPU aufgrund des vergleichsweise hohen CTE-Wertes von etwa  $10 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K}$  als Grundlage für die asymmetrische Wärmeausdehnung [3]. Kombinationen mit TPU und den aufgelisteten Materialien zeigten bereits in der Vergangenheit gute mechanische Eigenschaften bezüglich der Schichthaftung [4]. Jedoch soll die an den Proben durchgeführte Versuchsreihe Aufschluss bezüglich des Krümmungs- und Rückstellverhaltens sowie möglicher Defekte aufgrund thermischer Belastungen liefern. Zu diesem Zweck wurden jeweils zwei Proben angefertigt, welche über eine

6,0 mm dicke TPU-Schicht verfügen, auf die letztlich eine 1,0 mm, 1,6 mm, 2,0 mm, 2,6 mm und 3,0 mm dicke Starrschicht aufgetragen wurde. Um die Krümmungseigenschaften zu verbessern, wurde eine Druckorientierung gewählt, welche der Längsachse der Proben folgt. Die Proben wurden nach dem Fertigungsprozess auf Defekte untersucht und deren Krümmung im Ausgangszustand dokumentiert. Anschließend wurden die Proben in einem Heißluftofen auf die jeweilige Wärmeformbeständigkeitstemperatur der Starrschicht erhitzt und mit Referenzstäben verglichen, die keiner Wärmebehandlung unterzogen wurden. Zuletzt wurde die Rückstellung nach der Abkühlung der Proben auf Raumtemperatur untersucht, indem diese nach der Abkühlung ebenfalls mit den Referenzstäben verglichen wurden.

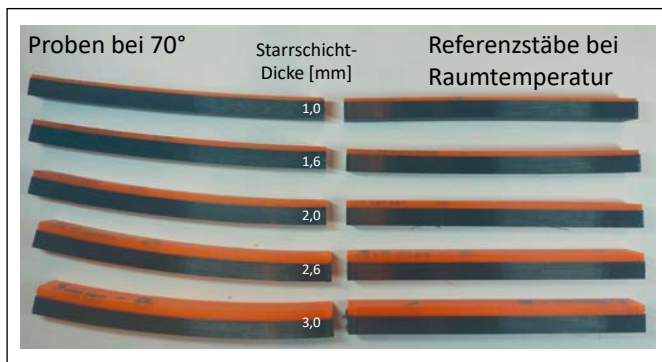


Abbildung 3: TPU/PET-G-Proben auf 70 °C erhitzt

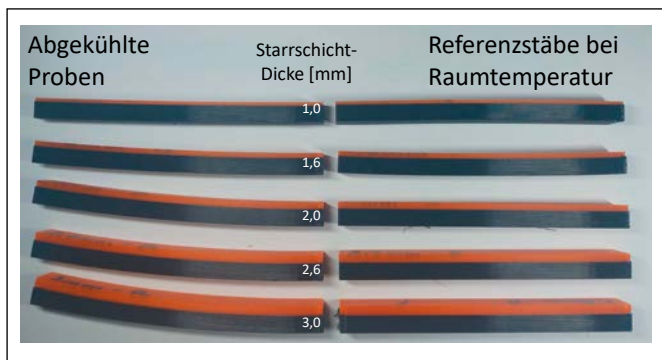


Abbildung 4: TPU/PET-G-Proben nach Abkühlung auf RT

Für die weitere Entwicklung des Greifsystems wird auf eine Paarung von TPU mit PET-G aufgrund der guten Rückstelleigenschaften gesetzt. Somit wird die maximale Dauerbetriebstemperatur durch den PET-G-Anteil bestimmt und beträgt, entsprechend des Datenblatts, 70 °C [5].

### 2.3 Rechnerische Ermittlung des Krümmungsradius eines unidirektionalen Krümmungsstabes

Krümmungsradius des Prüfstabes anhand der Bimetall-Formel nach Timoshenko:

$$R = \frac{t \cdot \left[ 3 \cdot (1+m)^2 + (1+m \cdot n) \cdot \left( m^2 + \frac{1}{m \cdot n} \right) \right]}{6 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \cdot (1+m)^2} \quad [6]$$

### 2.4 Rechnerische Ermittlung des Krümmungsradius eines bidirektionalen Verbundstabes

Bei der Implementierung einer aktiven Kühlung wird die Krümmung durch zwei unterschiedliche Temperaturen verursacht. Die Krümmung erfolgt somit durch die simultane Ausdehnung und Schrumpfung der jeweiligen TPU-Schichten. Somit wird das Krümmungsverhalten solch eines Stabes mit der Laminate-Theorie angenähert. Diese Formel liefert nach der Inversion der Matrix ebenfalls den Krümmungsradius, mit dem dann die Bogenhöhe ermittelt wird.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \kappa \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad [7]$$

Die Inversion der Matrix ergibt:

$$\kappa = \frac{A \cdot M - B \cdot N}{A \cdot D - B^2} \quad [7]$$

$$\varepsilon_0 = \frac{D \cdot N - B \cdot M}{A \cdot D - B^2} \quad [7]$$

Für Balken mit symmetrischem Schichtaufbau gilt rechnerisch  $B \approx 0$ , somit ergibt sich für diesen Fall:

$$\kappa = \frac{M}{D} \quad \text{und} \quad \varepsilon_0 = \frac{D \cdot N}{A \cdot D} \quad \text{mit} \quad R = \frac{1}{\kappa} \quad [8]$$

Zur Berechnung der Laminatsteifigkeiten wird die materialspezifische Querkontraktionszahl  $\mu$  berücksichtigt:

$$Q_i = \frac{E_i}{1 - \mu^2}; \quad A = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot (z_i - z_{i-1}) \quad [7]$$

$$B = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \frac{z_i^2 - z_{i-1}^2}{2}; \quad D = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \frac{z_i^3 - z_{i-1}^3}{3} \quad [7]$$

Berechnung der Normalkraft  $N$  und des Moments  $M$ :

$$N = \sum_i Q_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta T_i \cdot (z_i - z_{i-1}) \quad [7]$$

$$M = \sum_i Q_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta T_i \cdot \frac{z_i^2 - z_{i-1}^2}{2} \quad [7]$$

Die Schichtkoordinaten werden am Beispiel der Greiffinger mit Betriebstemperaturen zwischen 3,5 °C und 57,7 °C bei einer angenommenen Umgebungstemperatur von 20 °C wie folgt definiert:

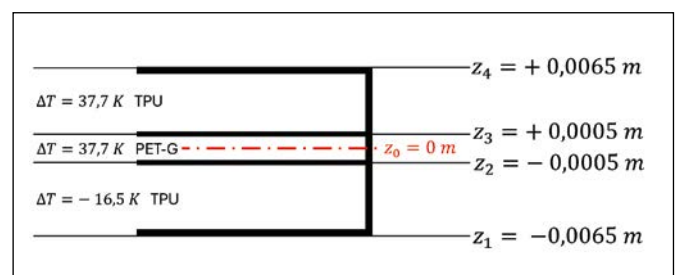


Abbildung 5: Definition der Schichtkoordinaten am Beispiel des BiTPU-Greifingers

Zuletzt werden die Größen A, B, D sowie N und M mit der Breite b des Biegestabes multipliziert, um die jeweiligen Momente und Kräfte zu erhalten.

### 2.5 Ermittlung der vertikalen Verschiebung eines Stabendes anhand des Krümmungsradius R

Zur Ermittlung der Bogenhöhe und damit auch der Verschiebung eines Stabendes bei Fixierung des Anderen wird die Formel zur Berechnung der Kreissegmenthöhe angewendet. Hierbei wird die Länge des Stabes verdoppelt, um statt der Krümmungshöhe die vertikale Verschiebung des Endes zu erhalten. Zunächst wird der Zentrierwinkel  $\gamma$  anhand der Stablänge s und des Krümmungsradius R bestimmt:

$$\gamma = \frac{2 \cdot s}{R} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad [8, \text{p. } 32]$$

$$h = R \cdot \left( 1 - \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \right) \quad [8, \text{p. } 32]$$

## 3 Durchgeführte Funktionstests

Um die Funktion des Greifers zu prüfen, wurden an diesem Funktionstests durchgeführt, die Aufschlüsse bezüglich der Maximallast, der Griffkraft und des Reaktionsvermögens liefern sollen. Hierfür wurde das Greifsystem an einem Roboter montiert, durch den CNC-gestützte Bewegungen ermöglicht werden. Während der Tests wurde die Temperatur der Druckluft, die in den oberen Kanal der Basis strömt, gemessen und protokolliert. Aus der Entwicklung des Greifers gingen drei Fingervarianten hervor. Somit wurden die Varianten BiTPU, ACV (Active Cooling Veins) und SC (Single Channel) mit den Längen 120 mm, 150 mm und 200 mm getestet. Als Handhabungsobjekt dienen Schachfiguren mit einer einheitlichen Nut am Fuß, an dem das Greifsystem mittels Krallenaufsätzen die Figuren greifen kann.

### Erläuterung der Fingervarianten

Die BiTPU-Variante entspricht der Beschreibung aus Kapitel 2, somit handelt es sich hierbei um Finger, die aus zwei 6,0 mm dicken, mit Kanälen versehenen TPU-Schichten bestehen, die durch eine 1,0 mm dicke PET-G-Schicht getrennt werden. Durch Schrumpfung der Gegenschicht soll während der Erhitzung der Innenschicht die Krümmung begünstigt werden. Die ACV-Variante verzichtet auf eine Verstärkung des Krümmungsverhaltens durch die Schrumpfung der Gegenseite. Durch die venenartige Struktur soll eine Schwächung der Krümmung durch die Steifigkeit der Gegenschicht minimiert und dabei die PET-G-Schicht aktiv gekühlt werden. Dadurch soll der Temperaturunterschied der Schichten erhöht werden, was die Krümmung des Fingers maximieren soll. Die SC-Variante besteht aus einer TPU- und einer PET-G-Schicht. Somit wird lediglich ein Ausgang des Wirbelrohres genutzt, um die Greifbewegung zu

realisieren. In den Testversuchen wurde ausschließlich eine 120 mm lange Variante des SC-Fingers getestet, da hiermit das Wirbelrohr ineffizient genutzt wird.

### 3.1 Reaktionszeit und maximaler Verfahrensweg

Um die Reaktionszeit und den maximalen Verfahrensweg des Greifsystems zu erfassen, wurde während des Betriebs unterhalb der Finger eine Messskala angebracht. Zur Messung der Reaktionszeit wurden die Bewegungsabläufe mit einer Videokamera erfasst.

### 3.2 Maximallast und Griffkraft

Für die Ermittlung der Maximallast wurden hohle Dummies angefertigt, die mit den Fingerkrallen des Greifers kompatibel sind. Die Dummies wurden anschließend mit Gewichten auf 100 g, 150 g, 200 g und 250 g erschwert. Maximallasten wurden demnach im Ausgangs- und im maximal geschlossenen Zustand des Systems gemessen. Die Messung im Ausgangszustand soll das Verhalten des Systems bei einem Ausfall der Druckluftversorgung simulieren. Zur Messung der Griffkraft wurde das System mit zwei Fingern betrieben, um eine Laborwaage zu greifen, an der die Griffkraft direkt abgelesen wurde.

## 4 Ergebnisse der Versuchsauswertungen

Tabelle 1: Anwendung des Längenfaktors  $\delta$  an der BiTPU-Variante

Länge [mm]	max. Weg [mm]	Griffkraft [g]	$v_{\text{Finger}}$ [mm/s]	$\delta_L$	$\delta_{F_g}$	$\delta_s$	$\delta_{t_r}$
120,00	6,33	38,00	0,176	1,00	1,00	1,00	1,00
150,00	8,73	24,00	0,275	1,25	1,38	0,63	1,56
200,00	14,38	17,00	0,282	1,67	2,27	0,45	1,60

Aus den Ergebnissen der Versuche geht hervor, dass die zunehmende Fingerlänge den Bewegungsraum und die Reaktionszeit verbessert. Jedoch verringert sich die maximal aufnehmbare Last und Griffkraft des Greifsystems aufgrund der reduzierten Steifigkeit der Finger. Um den Einfluss der Fingerlänge auf die untersuchten Betriebsparameter zu beschreiben, wurde der dimensionslose Längenfaktor  $\delta$  eingeführt. Als Ausgangswerte dienen hierbei die Messwerte aus den Versuchsreihen der BiTPU-Variante mit einer Länge von 120 mm.

$$\delta_L = \frac{L}{L_0}, \delta_{F_g} = \frac{F_g}{F_{g,0}}, \delta_s = \frac{s}{s_0}, \delta_{t_r} = \frac{t_r}{t_{r,0}}$$

Sowohl die Laminat-Theorie als auch die Bimetall-Formel nach Timoshenko weichen von den gemessenen Werten aus den Versuchen ab. Dies kann sowohl auf die mangelnden Materialdaten der Hersteller als auch auf die verwendeten Formeln zurückgeführt werden, da Thermoplaste die Eigenschaft besitzen, bei erhöhten Temperaturen einen geringeren E-Modul aufzuweisen [9].

#### 4.1 Reaktionszeit und maximaler Schließ- und Öffnungsweg

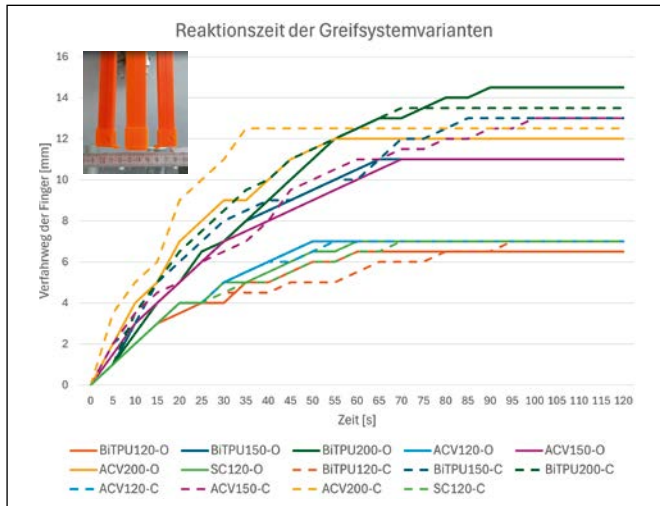


Abbildung 6: Reaktionszeit und maximaler Verfahrweg der getesteten Fingervarianten

#### 4.2 Griffkraft und Maximallast

Die Griffkraft wurde zwischen zwei Greifziffern mittels einer Küchenwaage ermittelt. In Versuchen konnten mit dem umgesetzten Greifsystem Bauteile mit mehr als 250 g Gewicht sicher gehandhabt werden.

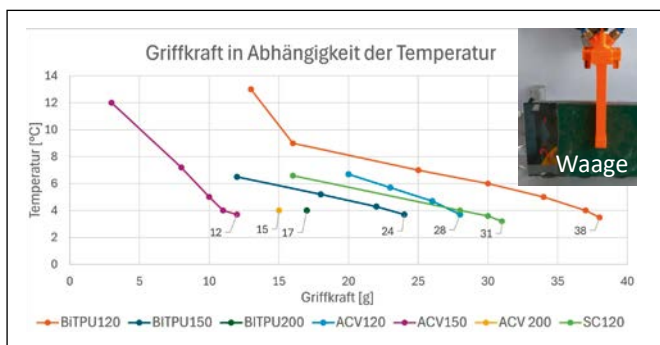


Abbildung 7: Griffkraft der Fingervarianten in Abhängigkeit der Temperatur der Innenseite

### 5 Qualitätssicherung mittels industrieller Computertomografie

Die innerhalb der Greifer erzeugten Kanäle sind funktionsrelevant. Eine zerstörungsfreie Analyse ist daher unerlässlich, um den sicheren Einsatz zu gewährleisten. Klassische taktile und optische Messverfahren können bei diesen Strukturen kein Ergebnis liefern. Im Rahmen des Projekts wurde ein Computertomograf der Fa. Werth Messtechnik vom Typ TomoScope® XS Plus 160 eingesetzt, um einen vollständigen digitalen Zwilling der Geometrie des Bauteils zu erzeugen.

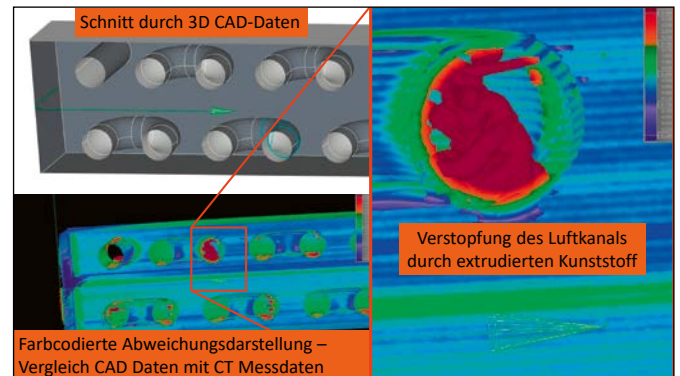


Abbildung 8: Industrielle Computertomografie zur Qualitätsanalyse (Bilder: Schneider, OTH Amberg-Weiden)

Neben den Abmessungen der real gedruckten Greifziffern konnten auch die für die Funktion relevanten Querschnitte sowie die Oberflächenqualität bewertet werden. Zusätzlich fielen bei der CT-Messung Fehlstellen des FFF-Drucks auf, die die Luftkanäle des 4D-gedruckten Bauteils zu mehr als der Hälfte verschlossen und so die Funktion des Greifzingers massiv beeinträchtigt hätten.

### 6 Ergebnis/Zusammenfassung/Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz temperierter Druckluft der 4D-Druck geeignet ist, eine Greifaufgabe zu lösen. In Umgebungen, in denen unterschiedliche Temperaturen abhängig von der Position (z. B. Tauchbad in kochendem Wasser und Kühlschrank) oder der Zeit vorherrschen, kommt ein an die Bedingungen angepasster 4D-Greifer vollkommen ohne weitere Antriebsmedien aus.

Die wesentlichen Vorteile eines in 4D-Technologie hergestellten Greifsystems sind:

- Verschleißfreiheit
- Wartungsfreiheit
- Geringes Gewicht
- Geringer Raumbedarf
- Sicher auch bei Ausfall von Antriebsmedien
- Theoretisch keine Zuleitungen erforderlich
- Schnelle und kostengünstige Herstellbarkeit durch 3D-Druck
- Gut geeignet für empfindliche Bauteile

Die wesentlichen Nachteile sind:

- Lange Reaktionszeit
- Geringe Griffkraft
- Geringer Schließweg

Daneben konnte gezeigt werden, dass der Einsatz der Computertomografie zur Messung von Bauteilen gerade in Verbindung mit dem 3D-Druck, bei dem funktionsrelevante Innenstrukturen erzeugt werden können, unver-

zichtbar ist. Die Vorteile der industriellen Computertomografie sind:

- Vollständige Messung des Bauteils möglich
- Zerstörungsfreie Prüfung des Innenlebens von Bauteilen
- Erzeugen eines geometrischen digitalen Zwillings des Bauteils
- Nachträgliche Messung von Merkmalen am zuvor erzeugten Datensatz
- Zeitgewinn gegenüber der Erstellung von Schlibildern

---

### **Referenzen:**

- [1] Stephanie Torta, Jonathan Torta, 3D Printing - An Introduction, Dulles, Virginia and Boston Massachusetts, Mercury Learning and Information, 2019
- [2] Muni Raj Maurya, Kishor Kumar Sadasivuni, John-John Cabibihan, Shahzada Ahmad, Samrana Kazim, Shape Memory Composites Based on Polymeres and Metals for 4D Printing, Cham, Schweiz, Springer Nature Switzerland AG, 2022
- [3] Ultimaker, Technisches Datenblatt TPU 95A, [https://www.igo3d.com/mediafiles/Sonstiges/Ultimaker/UM\\_TDS%20TPU%2095A%20v3.010-ger-DE.pdf](https://www.igo3d.com/mediafiles/Sonstiges/Ultimaker/UM_TDS%20TPU%2095A%20v3.010-ger-DE.pdf), [abgerufen am 05.09.2025]
- [4] Yonathan Morocz, Compatibility of FDM Polymers at Multi-Material Interfaces, Juncker Lab, Montreal Canada, 2024
- [5] eSun, PETG – Technical Data Sheet, [www.esun3d.com/uploads/eSUN\\_PETG-Filament\\_TDS\\_V4.o.pdf](http://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PETG-Filament_TDS_V4.o.pdf), [abgerufen am 05.09.2025]
- [6] G. D. Angel, G. Haritos, An Immediate Formula for the Radius of Curvature of A Bimetallic Strip, International Journal of Engineering Research & Technology, Gujarat, India, 12.12.2013.
- [7] D. Roylance, Laminated Composite Plates, MIT, Cambridge, Massachusetts, 10.02.2000.
- [8] Lothar Papula, Mathematische Formelsammlung, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.
- [9] Felipe C. Amorim, Joao F. B. Souza, Heraldo S. da Costa Mattos, Joao M. L. Reis, Temperature effect on the tensile properties of unplasticized polyvinyl chloride, Danbury, CT, SPE Polymers, Bd. 3, pp. 99-104, 1.2.2022.

### **Fördergeber:**

Der im Projekt eingesetzte Computertomograf vom Typ Werth TomoScope® XS Plus 160 wurde im Rahmen des vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie geförderten Vorhabens Denkwelt Oberpfalz im Use Case „Erstellen digitaler Zwillinge von Bauteilen mittels 3D-Scan“ beschafft.

Gefördert durch



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

### **KONTAKT**



**Michael Keilbach, B.Eng.**

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



**Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Blöchl**

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

[w.bloechl@oth-aw.de](mailto:w.bloechl@oth-aw.de)

## Sensorarrays: Optimierte Iridiumdioxid-Beschichtungen für elektrochemische Sensoren

### Zusammenfassung

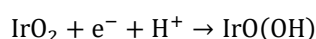
Aktive Beschichtungen für Elektroden aus Iridiumdioxid ( $\text{IrO}_2$ ) eignen sich für die pH-Messung in elektrochemischen Sensorarrays. Mit verschiedenen Analysemethoden – Mikroskopie, Röntgendiffraktometrie, pH-Titration und Cyclovoltammetrie – werden die Zusammenhänge zwischen Beschichtungsstruktur und elektrochemischem Verhalten aufgeklärt. Eine auf die Elektrodenfläche bezogene Stoffmenge von  $10 \mu\text{mol}/\text{cm}^2$  bietet die optimale Balance zwischen Homogenität, linearer pH-Abhängigkeit und ausprägten Voltammetriesignalen. Faraday- und Kapazitätsstrom des Ir(III/IV)-Redoxpeaks bilden die Elektrodenaktivität aussagekräftig ab.

### Abstract

Active coatings for iridium oxide ( $\text{IrO}_2$ ) electrodes are suitable for pH measurement in electrochemical sensor arrays. Various analytical methods – microscopy, X-ray diffraction, pH titration, and cyclovoltammetry – are used to elucidate the relationships between coating structure and electrochemical behavior. A substance quantity of  $10 \mu\text{mol}/\text{cm}^2$  relative to the electrode surface offers the optimal balance between homogeneity, linear pH dependence, and pronounced voltammetry signals. Faraday and capacitance currents of the Ir(III/IV) redox peak provide a meaningful representation of electrode activity.

### Einleitung

Die wichtigsten Bestandteile elektrochemischer Sensorarrays sind die Elektroden, die elektrische Ladung mit den Analyten im Elektrolyten (Ionenleiter) austauschen. Der Ladungsdurchtritt ist an eine chemische Redoxreaktion gekoppelt, auf die Elektrodenmaterial, Elektrolytzusammensetzung und elektrische Spannung Einfluss nehmen. Neben der erwünschten Umwandlung von Ir(III) zu Ir(IV), die zur pH-Wert-Messung verwendet wird, können auch unerwünschte Reaktionen wie beispielsweise die Korrosion einer Zinkelektrode stattfinden [1-5].



Über die Wahl des Aktivmaterials hinaus spielt die Beschichtungsmethode eine Rolle für die Stabilität der Elektrode. Im folgenden Beitrag wird ein standardisiertes Vorgehen zur Optimierung aktiver Beschichtungen für Elektroden am Beispiel Iridiumdioxid dargestellt.

### Beschichtungstechnik

Abbildung 1 zeigt die Struktur eines Sensorarrays aus acht Elektroden. Kontakt für die Aktivschicht ist eine Goldleiterbahn, welche durch Siebdruck einer Leiterpaste (Vibrantz 8844-G) auf einen Aluminiumoxid-Träger aufgebracht und anschließend bei  $850^\circ\text{C}$  (30 min, Aufheizrate  $5 \text{ K}/\text{min}$ ) eingebrannt wird. Um ein Verlaufen der Beschichtungslösung zu vermeiden, wird das  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Plättchen außerhalb der Elektrodenflächen hydrophobiert. Dies erfolgt durch Siebdruck mit einer Paste aus 5.5 g Ethylcellulose (ET 200), 88 mL Terpeneol und 22 mL Ethanol. Nach anschließender Trocknung bei  $120^\circ\text{C}$  für eine Stunde ist der Array-Rohling bereit für die Beschichtung mit dem Aktivmaterial.

Die Ausgangslösung für die Tropfbeschichtung besteht aus 19.17 mg  $\text{IrCl}_3$  in 456  $\mu\text{L}$  Wasser/Ethylenglycol (1:2). Diese Stammlösung wurde mit Wasser/Ethylenglycol so verdünnt, dass acht unterschiedliche Konzentrationen entstanden (Tabelle 1). Nach Tropfbeschichtung der

Goldkontakte mit einer 50- $\mu\text{L}$ -Pipette folgt eine Temperaturbehandlung: 35 min 65  $^{\circ}\text{C}$ , 35 min 95  $^{\circ}\text{C}$ , 35 min 200  $^{\circ}\text{C}$  und 30 min 500  $^{\circ}\text{C}$  mit einer Aufheizrate von 5 K/min. Diese Abfolge soll eine kontrollierte Verdampfung der Lösemittel ermöglichen und eine homogene Schicht erzeugen. Oberhalb 200  $^{\circ}\text{C}$  erfolgt die thermische Oxidation von  $\text{IrCl}_3$  zu  $\text{IrO}_2$  und die Zersetzung der hydrophoben Schicht, die nahezu vollständig verschwindet.

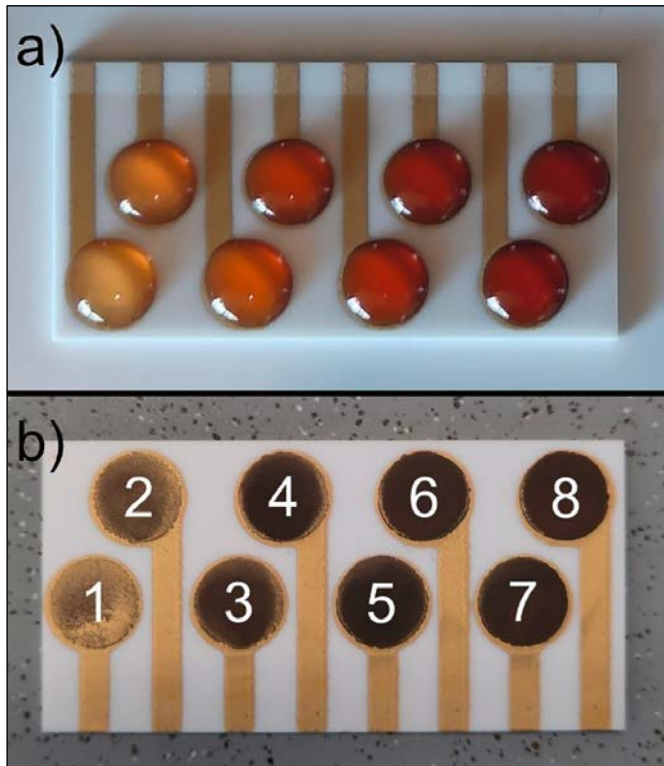


Abbildung 1: (a) Tropfbeschichtung eines 8-Elektroden-Arrays mit Iridiumdioxid auf Goldleiterbahnen und Aluminiumoxid-Träger. (b) 8-Elektroden-Array mit unterschiedlichen Beschichtungsmassen des Aktivmaterials. Die runden Elektrodenflächen haben eine Größe von 0,503  $\text{cm}^2$ .

Tabelle 1: Verdünnungsreihe der Beschichtungslösung für ein 8-Elektroden- $\text{IrO}_2$ -Array. Stammlösung: 19,17 mg  $\text{IrCl}_3$  (0,1408 mol/L), 152  $\mu\text{L}$   $\text{H}_2\text{O}$ , 304  $\mu\text{L}$  Ethylenglycol; Verdünnungslösung: 147  $\mu\text{L}$   $\text{H}_2\text{O}$ , 293  $\mu\text{L}$  Ethylenglycol.

Elektrode	Stamm-lösung ( $\mu\text{L}$ )	Verdün-nung ( $\mu\text{L}$ )	Konzen-tration $c$ mol/L	Belegung $n(\text{Ir})/A$ $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$
1	8	112	0,0094	1
2	16	96	0,0201	2
3	32	80	0,0402	4
4	48	64	0,0603	6
5	64	48	0,0805	8
6	80	32	0,1006	10
7	96	16	0,1207	12
8	112	0	0,1408	14

## Mikroskopische Charakterisierung

Die Elektroden wurden unter dem Digitalmikroskop (Keyence VHX-EA300) auf Homogenität und Schichtqualität geprüft. In Abbildung 3 fällt die dunkle Farbe der  $\text{IrO}_2$ -Beschichtung auf [10]. Die Abwesenheit blauer Flecken lässt vermuten, dass das Oxid in reiner Form und nicht als Hydrat vorliegt. Die silberweißen Flecken weisen auf einen metallischen Anteil hin [11]. Bei Belegungen um  $n(\text{Ir})/A = 2 \mu\text{mol}/\text{cm}^2$  wurde keine einheitliche Beschichtung erzielt, bei 4 bis 8  $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$  ist eine homogene Schicht zu sehen und ab 10  $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$  deuten Flecken auf ein Schichtwachstum in die Höhe hin, das die Stabilität der Beschichtung beeinträchtigen könnte. Zudem erscheint bei höherer Beschichtungsmasse eine Wüstenstruktur der Elektrodenoberfläche.

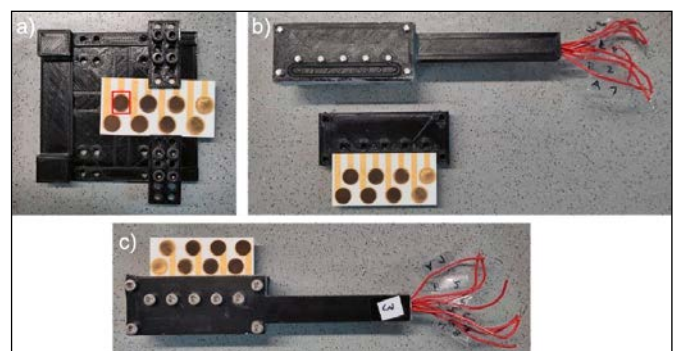


Abbildung 2: (a) XRD-Halterung für Elektrodenarrays mit Untersuchungsbereich des Röntgenstrahls (rot markiert). (b) Probenhalter mit Pogopins für elektrochemische Untersuchungen der siebgedruckten Elektrodenarrays, zerlegt und (c) zusammengebaut.

## Kristallstruktur

Die Röntgendiffraktometrie (XRD) mit Rigaku MiniFlex 600 – im Winkelbereich von  $2\theta = 20^{\circ}$  bis  $100^{\circ}$  ( $1,0^{\circ}/\text{min}$ ), Soller-Blende (HS) 2 mm, Divergenzblende (DS)  $0,625^{\circ}$  und eigenem Probenhalter zur Ausrichtung des Röntgenstrahls (Abbildung 2a) – liefert Daten zur Berechnung des RIR (Reference Intensity Ratio) für die prozentuale Zusammensetzung der Probe aus Metalloxid, Gold und Aluminiumoxid. Die Halbwertsbreite  $\Gamma$  der Beugungsmaxima liefert mittels der Scherrer-Gleichung die Kristallitgröße  $L$  der Metalloxide ( $K$ : Scherrer-Faktor, Wellenlänge des Röntgenstrahls:  $\lambda = 0,15405293 \text{ nm}$ ,  $\theta$ : Bragg-Winkel) [6,7].

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{\Gamma(2\theta) \cdot \cos(\theta)}$$

In den XRD-Spektren der Elektroden in Abbildung 4 nimmt die Höhe und Fläche der  $\text{IrO}_2$ -spezifischen Beugungsmaxima mit der Belegung zu. In dichteren Schichten ab 6  $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$  sind Signale von metallischem Iridium zu erkennen. Bis 10  $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$  wächst der  $\text{IrO}_2$ -Anteil in der Beschichtung; darüber stellt sich ein Plateau-Wert ein (Abbildung 5). Der Röntgenstrahl durchdringt die

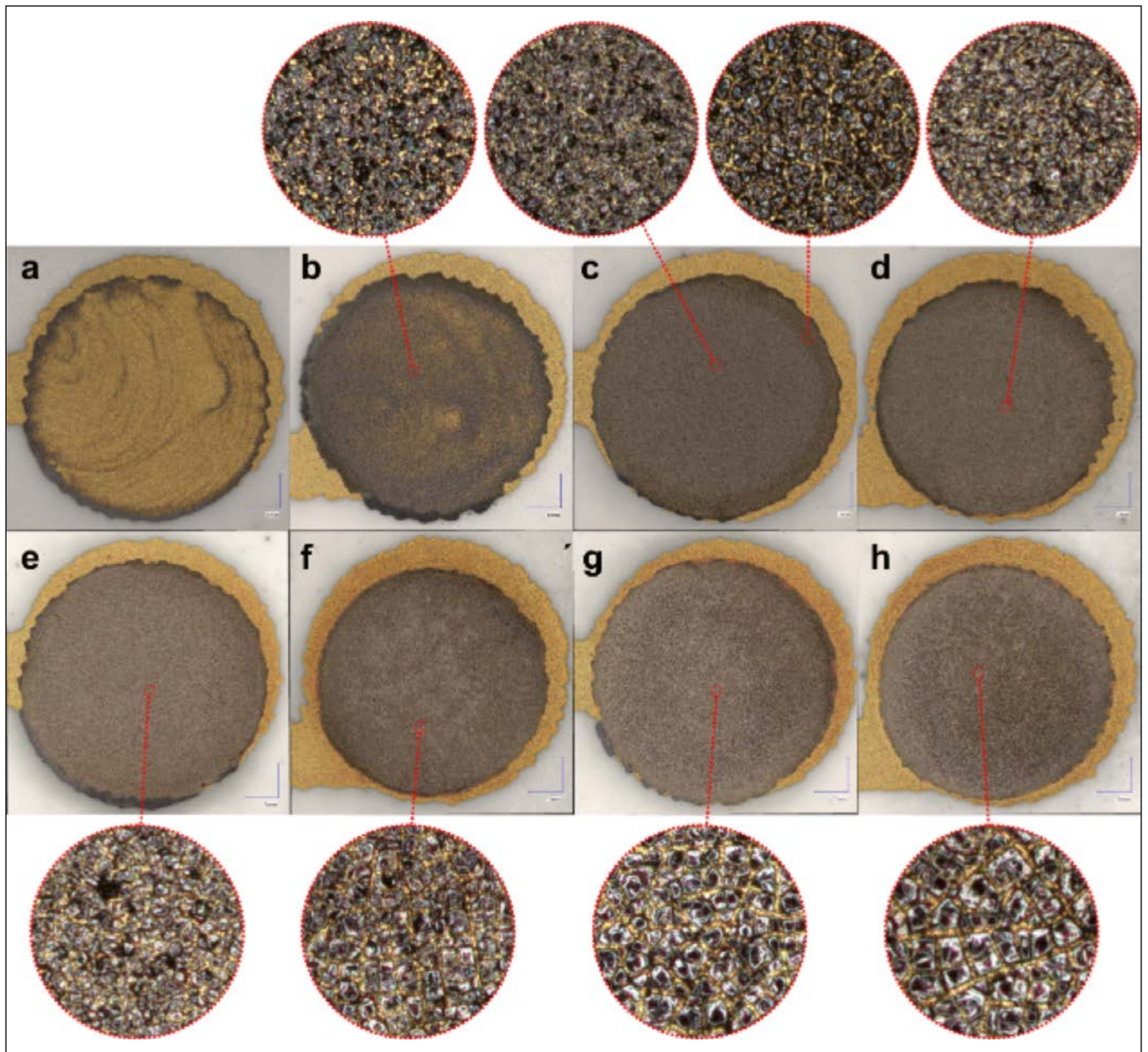


Abbildung 3: Mikroskopische Oberfläche von Ir/IrO<sub>2</sub>-Elektroden mit unterschiedlichen Metalloxid-Konzentrationen. Blauer Maßstab: 1 mm, Vergrößerung 20-fach. Metalloxid-Belugung: (a) 1, (b) 2, (c) 4, (d) 6, (e) 8, (f) 10, (g) 12 und (h) 14 μmol/cm<sup>2</sup>.

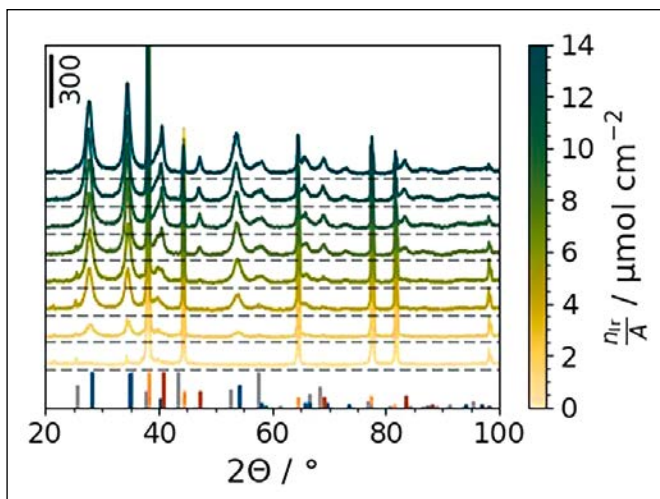


Abbildung 4: XRD-Spektren der Iridiumdioxid-Elektroden mit zunehmender Beschichtungsmenge. Unterste Zeile: Referenz-Beugungsmuster für Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (grau), Gold (orange), IrO<sub>2</sub> (blau) und Ir (rot).

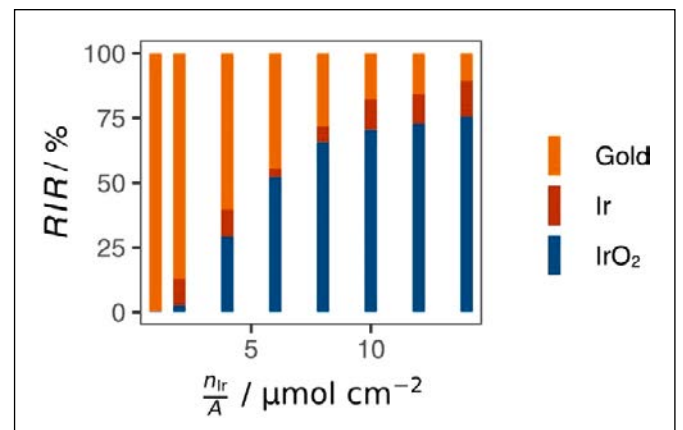


Abbildung 5: Prozentuale Zusammensetzung der Beschichtung nach dem Signalintensitätsverhältnis (RIR) aller acht Elektroden in Abhängigkeit der Beschichtungsmenge.

dicke IrO<sub>2</sub>-Schicht nicht mehr bis zur Gold-Leiterbahn. Ein Restanteil Gold wird in den Tälern der Wüstenstruktur detektiert, die sich in der Mikroskopie mit charakteristisch goldener Farbe zu erkennen geben. Die Beugungsmaxima der IrO<sub>2</sub>(110)- und IrO<sub>2</sub>(101)-Orientierung wurden mittels Voigt-Kurven angenähert und die Fläche und Halbwertsbreite bestimmt.

### pH-abhängiges Ruhepotential

Die elektrochemische Charakterisierung umfasst eine pH-Titration, bei der 100 mL eines modifizierten Britton-Robinson-Universalpuffers mit Natronlauge von pH 2.3 bis pH 12 bei 25 °C mit einem automatisierten Teststand umgesetzt werden [8,9]. In hundert pH-Schritten wird das Ruhepotential (OCP) für jeweils 30 Sekunden gemessen, wobei der Mittelwert der letzten 10 Sekunden den finalen Messwert bildet. Für den Anschluss der Elektroden an das Messgerät, wurde ein Probenhalter mit sogenannten Pogo-Pins konzipiert (Abbildung 2b), der das schnelle Austauschen der Arrays ohne Löt- oder Klebarbeiten ermöglicht.

Das Ruhepotential über dem pH-Wert zeigt für alle Beschichtungsmengen ein lineares, Nernst'sches Verhalten, wobei ab pH 10 ein Knick zu erkennen ist (Abbildung 6). Eine ausreißer-robuste Regressionsgerade mit der Scipy-Funktion „Siegel slopes“ [12,13] zeigt für die Belegung 12 μmol/cm<sup>2</sup> die beste Regression:

$$E = 733,3 \text{ mV} - 68.84 \text{ mV} \cdot \text{pH} \quad (R^2: 0.9916).$$

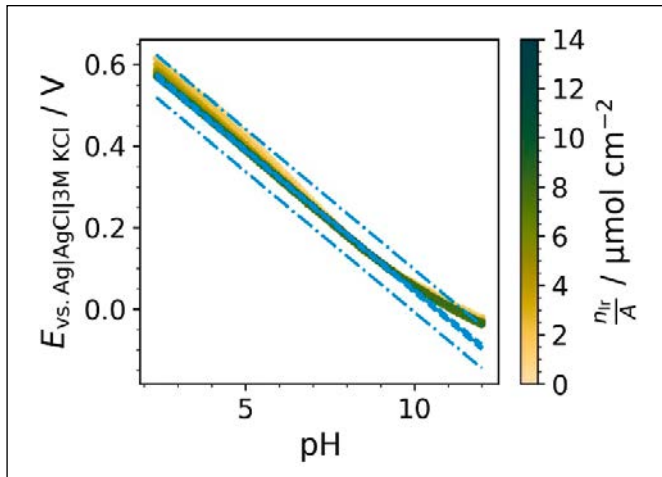


Abbildung 6: Ruhepotentiale (30 s) der acht IrO<sub>2</sub>-Elektroden gegen den pH-Wert bei Titration von 100 mL Universalpuffer mit 1-molarer Natronlauge gegen eine Ag|AgCl|3M KCl-Referenzelektrode. Blau: Regressionsgerade für 12 μmol/cm<sup>2</sup> ( $dE/dpH = -68.84 \text{ mV}$ ,  $E^0 = 733.3 \text{ mV}$ ,  $R^2: 0.9916$ ) mit Standardabweichung (gestrichelt) und 3-facher Standardabweichung (strichpunktiert).

### Cyclovoltammetrie

Mittels Cyclovoltammetrie (CV) mit einem Mehrkanalpotentiostaten (Palsens MultiEMStat4 HR) werden die acht Arbeitselektroden (WE) gegen eine Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode (RE) und eine Platinblech-Gegenelektrode (CE) in 0.5-molarer Schwefelsäure bei einem Spannungsvorschub von 0.1 V/s und 25 °C gemessen. Die Cyclovoltagramme in Abbildung 7 zeigen das typische Redoxverhalten des IrO<sub>2</sub>. Um 0 V bricht der Oxidationspeak der Gold-Leiterbahn durch. Die Ir(III/IV)-Redoxreaktion bestimmt das Ruhepotential um 0.7 V vs. Ag|AgCl. Der Oxidationsstrom lässt sich durch eine Gauß-Kurve annähern und daraus der Faraday'sche Anteil der geflossenen Ladung berechnen [5,14].

$$Q_F = \int I_F dt = \frac{1}{v} \int I_F dE$$

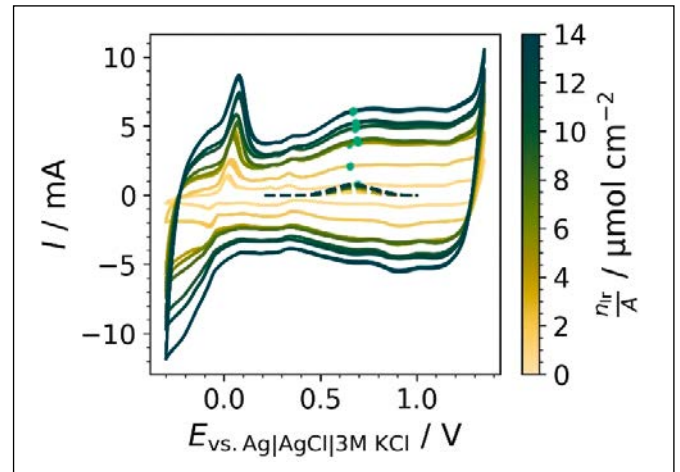


Abbildung 7: Cyclovoltammetrie der acht IrO<sub>2</sub>-Elektroden gegen eine Ag|AgCl|3M KCl-Referenz und eine Platinblech-Gegenelektrode. Elektrolyt: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5 mol/L, Spannungsvorschub  $v = 100 \text{ mV/s}$ . Grüne Punkte: Ir(III/IV)-Oxidation. Gestrichelt: angenäherte Gauß-Kurve für den Faraday'schen Stromanteil.

Der konstante Grundstrom der Doppelschichtaufladung wird subtrahiert. Dieser kapazitive Anteil nimmt mit steigender IrO<sub>2</sub>-Beschichtungsmenge zuerst stark zu und danach langsam unter Abflachung des Stromsignals ab. Der Trend deckt sich mit der wachsenden Kristallitgröße aus der XRD-Messung (Abbildung 8). In dicken Schichten finden sich demnach größere Partikel und tiefere Poren statt der fein verteilten Kristallite mit hoher Oberfläche. Die poröse „innere“ Oberfläche wird bei schnellem Spannungsvorschub nicht mehr vollständig geladen und geht als detektierbarer Faraday-Strom verloren [15].

$$I = I_F + I_C \quad \text{und} \quad \frac{I_F}{I} = 1 - \frac{I_C}{I}$$

In Schwefelsäure (pH 0.48) liegt ein Überangebot an H<sup>+</sup> vor. Die Faraday'sche Ladung der Ir(III/IV)-Reaktion hängt von der Anzahl der aktiven IrO<sub>2</sub>-Oberflächenplätze ab, so dass Q<sub>F</sub> als Maß für die aktiven Stellen gilt. Oberhalb

einer Belegung von  $10 \mu\text{mol}/\text{cm}^2$  tritt kein Zuwachs an Kapazität mehr ein, weil die innere Oberfläche für den Elektrolyten nicht mehr zugänglich ist. Anders formuliert: Die aktiven Stellen des  $\text{IrO}_2$  befinden sich auf der Elektrodenoberfläche.

Zusammenfassend lässt sich eine flächenbezogene Stoffmenge von  $10 \mu\text{mol Ir pro cm}^2$  Elektrodenfläche festlegen, um eine homogene Beschichtung, einen linearen pH-Potentialverlauf und deutliche voltammetrische Stromspitzen zu garantieren.

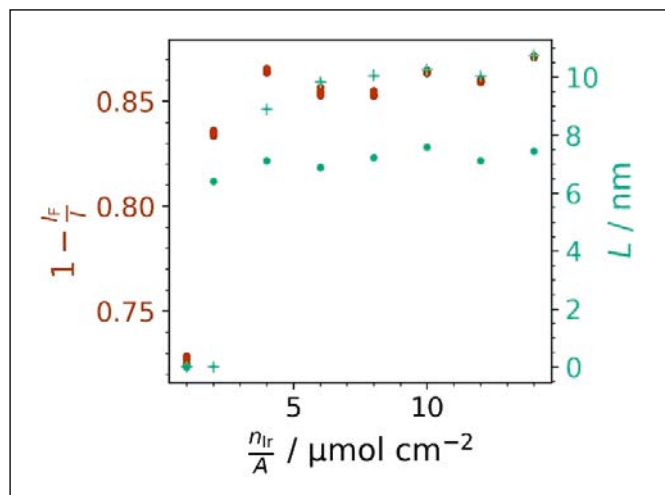


Abbildung 8: Anteil des kapazitiven Stroms,  $I_c/I = 1 - I_f/I$ , beim Potential der Ir(III)/Ir(IV)-Oxidation (rot) und röntgenografische Kristallitgröße in (●)  $\text{IrO}_2(110)$ - und (+)  $\text{IrO}_2(101)$ -Orientierung in Abhängigkeit der Beschichtungsmenge.

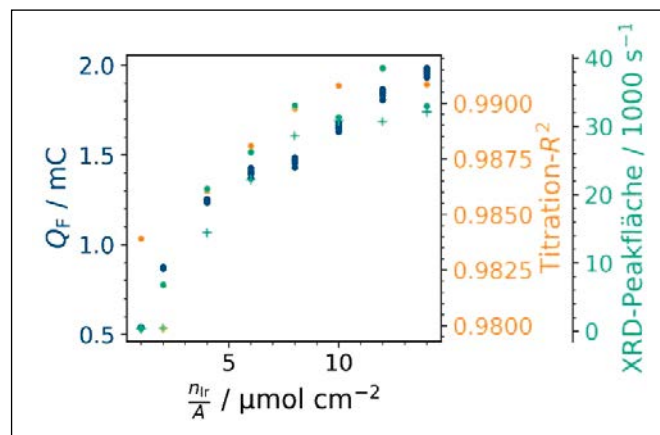


Abbildung 9: **Blau:** Faraday'sche Peakladung des Ir(III/IV)-Oxidationspeaks (angepasste Gauß-Kurve). **Orange:** Güte der Regressionsgeraden der pH-Titration. **Grün:** Fläche der XRD-Signale in (●)  $\text{IrO}_2(110)$ - und (+)  $\text{IrO}_2(101)$ -Orientierung (angepasste Voigt-Kurve) in Abhängigkeit der Beschichtungsmenge.

### Ausblick

Die optimale Beschichtung von  $10 \mu\text{mol}/\text{cm}^2$  für voltammetrische und potentiometrische  $\text{IrO}_2$ -Elektroden wurde durch Variation der Beschichtungsmasse gefunden. Mikroskopie, Röntgendiffraktometrie und Cyclovoltammetrie erhellen den Zusammenhang von Struktur und pH-Empfindlichkeit. Die Faraday'sche Ladung der Ir(III/IV)-Redoxreaktion zeigt sich als Maß für die Aktivität der Elektrode; sie wird durch Integration des durch eine Gauß-Funktion angenäherten Stromsignals berechnet. Das Verhältnis des Faraday'schen Stroms zum kapazitiven Grundstrom beschreibt, wie ausgeprägt der Redox-Peak gegenüber seinem Untergrund ist. Die Untersuchung beflügelt die weitere Entwicklung von Sensorarrays – hin zur elektronischen Zunge.

### Referenzen:

- [1] A. Bard, L. Faulkner, H. White, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 3rd ed., John Wiley: Oxford 2022.
- [2] P. Steegstra, E. Ahlberg, Influence of oxidation state on the pH dependence of hydrous iridium oxide films, *Electrochimica Acta* 76 (2012) 26-33.
- [3] J. Schottenbauer, Ch. Dinkelbach, P. Kurzweil, *Sensorarrays: Die elektronische Zunge*, Forschungsbericht 2025, OTH Amberg-Weiden.
- [4] D. Tibaduiza, M. Anaya, J. Gómez, J. Sarmiento, M. Perez, C. Lara, J. Ruiz, N. Osorio, K. Rodriguez, I. Hernandez, C. Sanchez, *Electronic Tongues and Noses: A General Overview*, *Biosensors* 14 (2024) 190.
- [5] J. Schottenbauer, C. Dinkelbach, C. Schell, P. Kurzweil, Voltammetrische pH-Messung mit Sensoren auf Basis von Metalloxiden, in: 12. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Innsbruck University Press, 2023.
- [6] C.R. Hubbard, R.L. Snyder, RIR-Measurement and Use in Quantitative XRD, *Powder Diffr.* 3 (1988) 74-77.
- [7] P. Scherrer, Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen, *Nachr. Ges. Wiss. zu Göttingen, Math.-Phys. Klasse* (1918) 98-100.

- [8] J. Schottenbauer, C. Gradl, P. Kurzweil, Labor 4.0 – Automatischer Teststand zur Erprobung elektrochemischer Sensoren, Forschungsbericht 2021, OTH Amberg-Weiden.
- [9] J. Schottenbauer, C. Dinkelbach, P. Kurzweil, Ein „drogenfreier“ Universalpuffer für elektrochemische Hochdurchsatzexperimente. Forschungsbericht 2023, OTH Amberg-Weiden.
- [10] S. Gottesfeld, J.D.E. McIntyre, G. Beni, J.L. Shay, Electrochromism in anodic iridium oxide films, Applied Physics Letters 33 (1978) 208-210.
- [11] A. F. Hollemann, N. Wiberg, E. Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, 103. Aufl., Walter de Gruyter: Berlin 2017.
- [12] P. Virtanen, et al., SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python, Nat. Methods 17 (2020) 261-272.
- [13] A. Siegel, Robust Regression Using Repeated Medians, Biometrika 69 (1982) 242-244.
- [14] J. Schottenbauer, S. Chalupczok, C. Schell, P. Kurzweil, Numerical analysis of cyclic voltammetry measurements in electrochemical sensor applications, Forschungsbericht 2020, OTH Amberg-Weiden.
- [15] S. Ardizzone, G. Fregonara, S. Trasatti, “Inner” and “outer” active surface of RuO<sub>2</sub> electrodes, Electrochimica Acta 35 (1990) 263-267.

## 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



**Christof Dinkelbach, M.Eng.**

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

c.dinkelbach@oth-aw.de



**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

## Marketing's Intellectual Journey - 131,536 Articles Unveiled

### Zusammenfassung

Die Marketingwissenschaft als Disziplin befindet sich in einer alarmierenden Krise [1], [2], die eine Entscheidung für Veränderungen erforderlich macht. Die Ergebnisse der Studie zeigen einen zersplitterten und identitätslosen Wissenschaftsbereich, der sich aus anderen Wissenschaften bedient. Interdisziplinäre Studien sind zwar notwendig, um die Relevanz eines Fachgebiets für die Praxis zu fördern und sich den sich wandelnden gesellschaftlichen Herausforderungen zu stellen, doch muss die Beziehung des Marketings zu anderen Wissenschaftsbereichen auf einer stärker wechselseitigen, ko-kreativen Grundlage beruhen. Auf der Grundlage der durchgeführten eingehenden Untersuchungen gehen die Autoren einen Schritt weiter als Hunt, der eine eigenständige Fähigkeit zur Theorieentwicklung fordert [3], indem sie aufzeigen, dass eine Re-Institutionalisierung des Fachgebiets die Natur der aktuellen Krisen möglicherweise nicht beheben kann. Daher braucht das Marketing eine neue Heimat im wissenschaftlichen und transdisziplinären Bereich, die auf cyber-physischen, öko-technologischen und human-kulturellen Säulen basiert und auf gemeinsamen Werten für die nächsten Generationen von Doktoranden beruht [4].

Die Forschung liefert einen soliden Überblick über die Geschichte der Marketingdisziplin anhand von 131.536 Veröffentlichungen in 72 führenden Fachzeitschriften der letzten 80 Jahre. Sie identifiziert die Ursachen der Krisen in der Marketingdisziplin und schafft eine klare Grundlage, auf der die nächsten Generationen von Marketingwissenschaftlern die kognitive Identität des Fachgebiets annehmen und so ihren individuellen Forschungsschwerpunkt vertreten können, während sie gleichzeitig eine ganzheitliche Sicht auf den Makrokosmos der Disziplin bewahren.

### Abstract

Marketing science as a discipline is in a state of alarming crisis [1], [2], requiring a decision for change to come. Evidence from the study of the field reveals a fractured and identity-lacking scientific domain with a borrowing attitude from other sciences. While interdisciplinary studies are necessary to advance a field's relevance to practice and to address evolving societal challenges, marketing's relationship with other scientific domains needs to be based on more reciprocal co-creative grounds. Based on the in-depth research conducted, the authors advance one step further than Hunt's call for an indigenous capacity for theory development [3], by demonstrating that a re-institutionalization of the field may not cure the nature of the contemporary crises. Therefore, marketing needs a new home within the scientific and transdisciplinary realm that stands on cyber-physical, eco-technological, and human-cultural pillars based on shared value for the next generations of doctoral scholars [4].

The research establishes a solid account of the history of the marketing discipline from the 131,536 literatures published in 72 leading journals of the field over the last 80 years. It identifies the roots of crises in the marketing discipline and lays a clear foundation wherein the next generations of marketing scholars can embrace the cognitive identity of the field and thus represent their individual research concentration while maintaining a holistic view of the macrocosm of the discipline.



land” in marketing with the techniques and tools of AI for greater precision and objectivity in establishing unbiased labeling of “topic-keyword relationships”.

### 3 Analysis

Multiple Correspondence Analysis (MCA) was used to determine the relationship between topic terms and keywords. MCA is an exploratory data analysis technique for the graphical display of multivariate categorical data [6] and aims to explain the interdependence between a set of categorical variables (keywords and topics), similar to a principal component analysis. It allows the researcher to explore and analyze multi-way tables to detect structure in the relationships between nominal variables [7].

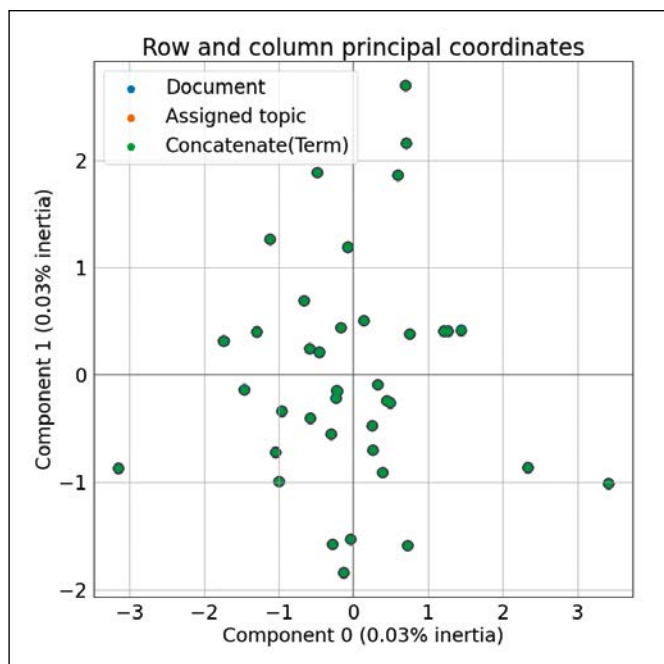


Figure 3: MCA Analysis

A Correspondence Analysis (CA) was performed to show the relationship between the assigned topics and the grouped years (Figure 4). The analysis provides a pair of coordinates in two-dimensional space for each of the 131,536 articles in the dataset. The horizontal axis of the CA analysis map represents the chronological development of marketing thought, with older topics on the left and newer ones on the right. Early marketing literature (1950s-1980s) focused primarily on foundational structures and efficiency-oriented topics. These topics laid the foundation for modern marketing by emphasizing operational efficiency, segmentation, and structured decision making. In the 1990s and early 2000s, strategic management and globalization emerged as dominant themes, reflected in topics such as Marketing in Emerging Markets, International Marketing Strategies, and Cultural Identity in a Globalized Marketplace. Further research in Consumer Behaviour during this period led to an increased focus on Price competition, Promotional strategies, and Gender Diversity in Marketing, signalling a shift

from localized models to a more interconnected global framework driven by economic liberalization and consumer psychology.

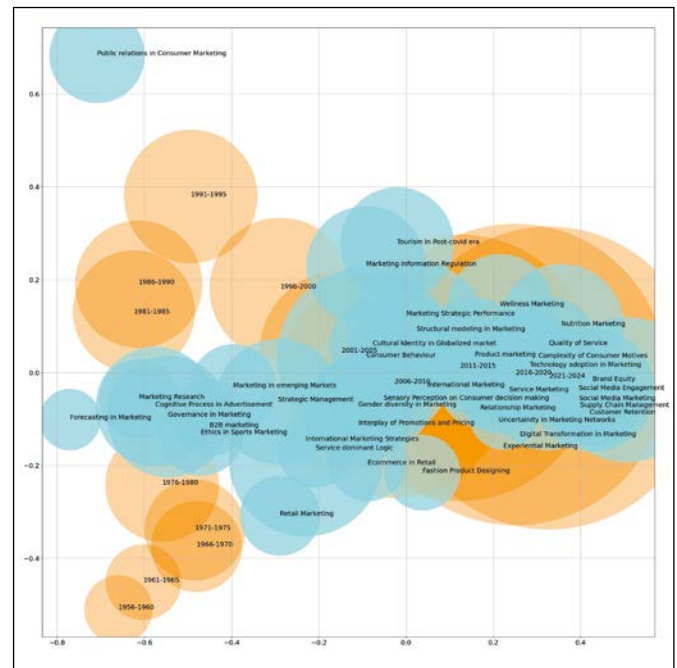


Figure 4: CA-Analysis indicating the association of topics (blue bubbles) with time (orange bubbles)

In the post-2010 era, the focus has shifted to experiential, technology-driven, and socially responsible marketing. Influential concepts such as service-dominant logic and marketing myopia in the early 2000s evolved into key themes such as Service Marketing, Relationship Marketing, Experiential Marketing, and Quality of Service in the 2010s. At the same time, advances in internet technologies and digitalization fuelled the rise of E-Commerce, Digital Transformation, Technology Adoption in Marketing, and Structural Equation Modelling in Marketing. In the late 2010s, marketing research increasingly focused on the Complexity of Consumer Motivations, leading to the prominence of Consumer Engagement on Social Media Platforms, Uncertainty in Supply Chains, and Risk Perception in Marketing Strategies.

While the first 40 years of research emphasized structural and strategic aspects of marketing, the last 40 years have seen a shift toward consumer-centric and behavioural models, with an increasing emphasis on digital marketing and interactive platforms. This interplay between systematic efficiency and human-centred engagement underscores the dual nature of marketing. Looking ahead, the convergence of these dimensions suggests that AI-driven analytics, behavioural insights, and ethical consumer engagement will define the next phase of marketing evolution. The traces of this transformation identified in this research suggest that the foundations of cybernetics and complexity sciences in marketing – balancing data-driven precision with consumer experience – may become a key area for future exploration.

## 4 Conclusions

This paper aims to illustrate the structure and past evolution of the content of the marketing field, but also to find possible future directions for the development of marketing thought, derived from the authors' in-depth analysis of the publications. In fact, a history of almost 80 years is sufficient time to reflect on the maturity of the marketing discipline and examine the relationships among the subfields of marketing, thus considering the structural evolution of the field over time since its inception. Based on this research, the authors enumerate that marketing in the digital age must evolve beyond conventional strategies and align with the proposed six dimensions that define its future trajectory:

- i. **Ecological Responsibility:** Marketing must integrate sustainable practices by aligning activities with nature and ethical behavior, ensuring to make a positive contribution to the environment while maintaining economic viability.
- ii. **Cyber-physical Integration:** The marketing domain extends beyond traditional marketplaces into the global digital and cyber-physical reality. The convergence of the digital and physical realms requires a shift in marketing strategies that leverage emerging technologies.
- iii. **Human-cultural Evolution:** As digital native cultures redefine consumer expectations, marketing must anticipate and respond to evolving human aspirations transcending borders and cultures, reshaping consumer identities and behaviors.
- iv. **Understanding the Consumer Essence:** Marketing should move beyond the traditional focus on USPs to a deeper exploration of consumer motivations, values, and experiences. The focus should be on mindful consumption and moderation, where brands foster meaningful connections rather than transactional engagements.
- v. **Technology as a Value System:** Technology shapes human experience, especially in the Anthropocene era where digital innovations are redefining existence. Marketing must therefore design a valued perception of technology, as Alderson's postulates, from the marketing lens.
- vi. **Organizational Transformation and Shared Value:** Organizations must move from shareholder-driven models to a *raison d'être* that prioritizes decentralized value creation, ensuring that businesses enhance stakeholder well-being and societal progress.

While this research confirms Yadav [6] and Hunt's [7] observations about the nature of the decline of conceptual articles and the lack of indigenous themes and theory development in marketing [8], it still provides evidence that the contributions of purely conceptual articles are essential in addition to the quantitative papers. Here, a call to action to the peers could be shown that there is

an apparent need for additional theoretical contributions that would provide solid impulses to quantitative-based and consumer behavior-driven research to expand their themes in the image of fundamental marketing aspirations such as the dimensions of establishing sustainability. Lunde's sustainability in marketing [9] and Sheth's mindful consumption [10], managing and framing an AI value definition of marketing, and defining solid organizational theories for managing international companies so that effective marketing responses could be designed, and the theoretical limitations of the marketing field could be overcome [11], [7]. The model developed by Yadav [1] is a possible way forward, in which the role of doctoral programs has been observed as pivotal and topologically positioned at the locus of innovation and the frontier of viability for discipline. Figure 6 illustrates that the evolution of knowledge development within a discipline is a rather time-consuming process. This process of careful and deliberate *modus operandi* is the essence of discipline because it ensures that short-lived approaches and developments are carefully integrated or discarded [1].

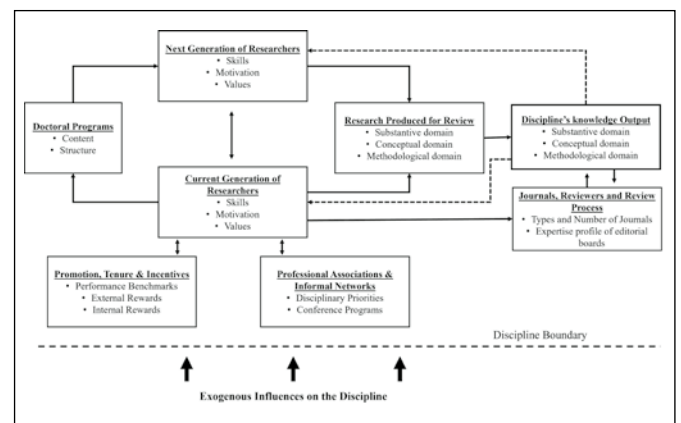


Figure 5: Determinants of the type of knowledge produced by a discipline [1]

These are sufficient reasons why it is essential for marketing to establish itself as a field of autopoietic sciences to provide a fundamental and integrated framework for the field to cope with contemporaneous technological developments and shifting societal forces by developing more fundamental grounds for more viable indigenous theory development capacities within marketing doctoral schools.



Scan this QR code to access high-resolution figures and other figures from this research paper:

---

## References:

- [1] S. Yadav, "Enhancing theory development in marketing", *AMS Review*, 4(1), 1-4, 2014.
- [2] S. Hunt, S. Madhavaram & H. Hatfield, "The marketing discipline's troubled trajectory: The manifesto conversation, candidates for central focus, and prognosis for renewal", *AMS Review*, 139-156, 2022, <https://doi.org/10.1007/s13162-022-00238-y>.
- [3] S. Hunt, "Indigenous theory development in marketing: the foundational premises approach", *AMS Review*, 10(1-2), 8-17, 2020.
- [4] S. Yadav, "Reimagining marketing doctoral programs", *AMS Review*, 10(1-2), 56-64, 2020.
- [5] J. Sheth, D. Gardner & D. Garrett, "Marketing Theory: Evolution and Evaluation", New York: Wiley, 1988.
- [6] S. Yadav, "The Decline of Conceptual Articles and Implications for Knowledge Development", *Journal of Marketing*, 74(1), 1-19, 2010.
- [7] S. Hunt, "For re-institutionalizing the marketing discipline in Era V", *AMS Review*, 189-198, 2020.
- [8] S. Hunt, "Advancing marketing strategy in the marketing discipline and beyond: from promise, to neglect, to prominence, to fragment (to promise?)", *Journal of Marketing Management*, 34(1-2), 16-51, 2018.
- [9] M. Lunde, "Sustainability in marketing: a systematic review unifying 20 years of theoretical and substantive contributions (1997–2016)", *AMS Review*, 8, 85-110, 2018.
- [10] J. Sheth, N. Sethia & S. Srinivas, "Mindful consumption: a customer-centric approach to sustainability", *Journal of the Academy of Marketing Science*, 39, 21-39, 2011.
- [11] Q. Kamran, S. Topp & J. Henseler, "Towards the Co-evolution of Food Experience Search Spaces Based on the Design Weltanschauung Model in Food Marketing", *Cogent Business & Management*, 8(1), 2021, doi: <https://doi.org/10.1080/23311975.2021.1901643>

## KONTAKT



**Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)**

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

[q.kamran@oth-aw.de](mailto:q.kamran@oth-aw.de)



**Patrick Baretto**

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

[p.baretto@oth-aw.de](mailto:p.baretto@oth-aw.de)

## Design for an approach of Rapprochement between Marketing Science and the Metaverse in Cyber-physical Realities

### Zusammenfassung

In einem Kontext der Ambiguität und Disruption ebnet diese Forschung den Weg für die Entdeckung des Metaversums als bedeutungsvollen Suchraum für das Marketing. Auf der Grundlage zeitgenössischer kultureller Artefakte innerhalb neu entstehender cyber-physischer Realitäten wurde eine Designmethodik unter Verwendung von KNIME und Python entwickelt, um 132.597 wissenschaftliche Artikel zu analysieren und so die historische Entwicklung der Marketingwissenschaft in Bezug auf das Metaversum nachzuzeichnen. Die Ergebnisse zeigen einen bruchstückhaften Entwicklungsverlauf, der durch ungelöste Herausforderungen und eine begrenzte Bereitschaft zur Bewältigung disruptiver Kräfte gekennzeichnet ist. Das Metaversum bietet eine bedeutende Chance, das Marketing als Disziplin durch ein integratives Annäherungsmodell neu zu positionieren. Luxus – verstanden als Artefakt von Geschmack, Kultur und Erfahrungspraxis – erweist sich als grundlegende Perspektive für die Schaffung innovativer, wertorientierter Erfahrungen in cyber-physischen Umgebungen. Die Studie zeigt, wie die kognitive Identität des Marketings durch die Konzentration auf periphere Belange und die Vernachlässigung von Kerndimensionen wie Technizität, nachhaltiges Design, Governance-Systeme, Organisationsmodellierung und gesellschaftliche Relevanz erodiert ist. Um diese Defizite zu beheben, stellt die Studie ein sechsteiliges Ausrichtungsmodell vor, das das Metaversum sowohl als Marktplatz für Ideen als auch als Plattform für Erfahrungsinnovation definiert und durch Dematerialisierung nachhaltiges Marketing ermöglicht. Durch die Ausrichtung am Metaversum kann das Marketing seine Daseinsberechtigung innerhalb der cyber-physischen Realitäten wiederentdecken. Der vorgeschlagene Rahmen führt das Marketing über Werbung und Aktionärsprimat hinaus hin zu gemeinsamen Werten, zivilisatorischen Idealen und Organisationsformen, die auf ökologische Symbiose abgestimmt sind – und stellt damit die gesellschaftliche Relevanz und disziplinäre Lebensfähigkeit des Marketings wieder her.

### Abstract

In contexts of ambiguity and disruption, this research establishes a designerly path for unveiling the Metaverse as a meaningful search space for marketing. Drawing on contemporary cultural artifacts within emerging cyber-physical realities, a design methodology was developed using KNIME and Python to analyze 132,597 academic articles, thereby tracing the historical evolution of marketing science in relation to the Metaverse. The findings reveal a fractured developmental trajectory, marked by unresolved challenges and limited preparedness to confront disruptive forces. Metaverse presents a significant opportunity to reposition marketing as a discipline through an integrative rapprochement model. Luxury – understood as an artifact of taste, culture, and experiential practice – emerges as a foundational lens for constructing innovative, value-driven experiences in cyber-physical environments. The research demonstrates how marketing's cognitive identity has eroded by focusing on peripheral concerns while neglecting core dimensions such as technicity, sustainable design, governance systems, organizational modeling, and societal relevance. To address these deficits, the study introduces a six-part alignment model that frames the Metaverse as both a marketplace of ideas and a platform for experiential innovation, enabling sustainable marketing through dematerialization. By aligning with the Metaverse, marketing can rediscover its *raison d'être* within cyber-physical realities. The proposed framework advances marketing beyond advertising and shareholder primacy toward shared value, civilizational ideals, and organizational forms attuned to ecological symbiosis – reestablishing marketing's societal relevance and disciplinary viability.

## 1 Introduction

Marketing, as a foundational field of management science, has faced challenges from multiple perspectives, affecting its *raison d'être*. These challenges include the rise of technicity, a global movement for sustainability, a lack of indigenous theoretical foundation and cognitive identity, and a lack of development of a solid framework for organizational structures. Given the field's long and prosperous history, 80 years of research is sufficient time for the field to reflect upon itself, account for its history, and thus propose a future direction while understanding the challenges affecting its foundation and making the field fit for the challenges ahead.

Metaverse represents a new reality and a new culture, which presents a vital opportunity for marketing science as a discipline to make a transformative impact. By transitioning from a normative perspective to the domain of digital humanities, we can develop indigenous theories and frameworks that enable traditional marketing and promote these innovations equally. This approach ensures that the disruptive capacity of contemporary evolution is utilized effectively, rather than being solely driven by firms based on the linearity of technicity, which originate from different traditions of emergence from bits and bytes. This approach avoids the atomistic universe of production and labor.

The novelty of this research is that it synthesizes the essence of traditional marketing, its history, and possible futures, and combines it with the latest developments within the emerging and most vibrant field of Metaverse. The fabric and nature of traditional marketing is changing, and it is pivoting towards the holistic discipline of digital humanities. New lines of service are emerging, as noted by Vargo & Lusch [1], and it is essential to adopt a novel perspective to comprehend their design, pro-

duction, and management, above all their necessity and value in the first place.

This research contributions identify the key issues for rethinking the current state of marketing based on a comprehensive study that establishes a solid longitudinal reflection of the field for scholars to self-assess how the current disruptions within the state of practical and scholarly discourses affect the contemporary path of indigenous knowledge development within the field of marketing. Based on a foundational analysis, this research provides a holistic historical foundation could be visualized, thus, to establish a flourishing frontier for innovation in the future and thus fostering a designerly collective imagination among scholars.

## 2 Research Design

The research methodology embraces many essential facets and necessary dimensions to establish itself as a contribution for future researchers who seek not only to acquire the necessary foundations to answer their research questions but moreover to gain a thorough understanding of the domains of marketing science and the metaverse, thereby contributing to the advancement of knowledge produced by disciplines.

Therefore, all topics analyzed within the scope of this paper went through thorough Machine Learning Algorithms (MLA) analysis to establish the historical account of the field of marketing and metaverse and in-depth CA. The authors have analyzed the total amount of textual data using unsupervised MLA to establish an objective account of the historical narrative. The authors have combined the scholarly analysis of the "lay of the land" in marketing and metaverse with the techniques and tools of AI to establish unbiased labelling of "topic-keyword relationships" with greater precision and objectivity.

Data Import	Pre-processing	Topic Detection via LDA	Grouping	Visualization
<ul style="list-style-type: none"> <li>A comprehensive selection of 131,536 articles (72 top journals) in marketing science and 916 scientific articles and 145 non-scientific articles</li> <li>The creation of an exhaustive Excel list encompassing all pertinent information such as authors, titles, journals, keywords, abstracts, publication years, citations, and annual citations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coding of keywords</li> <li>Tokenization of information about title, authors, and keywords, abstracts</li> <li>Punctuation erasure</li> <li>Filter out numbers</li> <li>Deletion of words with less than 3 characters</li> <li>Creation of stop list to exclude specific common words</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Single-parallel distributed implementation of LDA in KNIME for detecting the topics most relevant to the research project</li> <li>The node uses the MALLET topic modelling library.</li> <li>The generation of 60 topics is based on sensitivity analysis of 5 terms each.</li> <li>Alpha = 0.01 and Beta = 0.001 =&gt; fine granularity.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The grouping of topic terms</li> <li>The weighting of the qualitative evaluation</li> <li>The pivoting of topics over years</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The MCA was implemented to ascertain the correlation between topic terms and keywords</li> <li>Time series plots with trendlines demonstrate the number of assigned articles per topic over the course of several years.</li> <li>CA analysis is employed to illustrate the interrelation of assigned topics to grouped years and journals.</li> </ul>
<b>Main Interpretations resulting from the analyses</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>MCA analysis provides accurate results regarding the methodology employed.</li> <li>Marketing science and the Metaverse topics are identified as the most discussed topics in present and possible future due to the trend lines</li> <li>Marketing needs to establish itself as a holistic managerial science between (digital) humanities and business studies, thus bridge the gap towards sustainability and embracing the global culture of the digital natives</li> <li>The model establishes a model of rapprochement between both fields by dissolving the tension by identifying the challenges the both disciplines face contemporarily and by visualizing a solution search space</li> </ul>				

Figure 1: Methodology of the Analysis

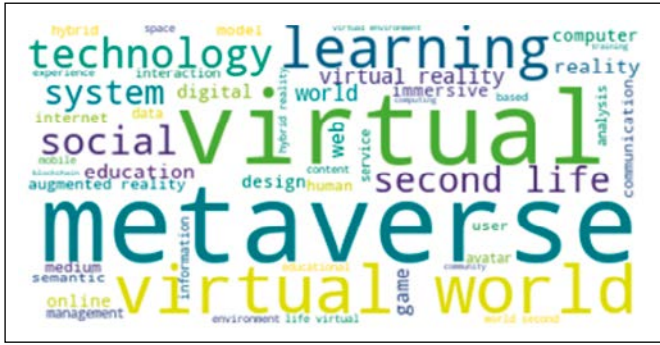


Figure 2: Word Cloud Term Weight (Metaverse)



Figure 3: Word Cloud Term Weight (Marketing science)

### 3 Analysis

To illuminate the interrelationships among the disparate subjects, MCA was implemented, whereby the topic terms and keywords were examined and analysed. The MCA was utilized to assess the temporal dynamics of these relationships, in accordance with the methodology outlined by Furrer et al. [2]. As illustrated in Figure 4 below the keywords (blue points), associated terms (green points), and subordinate topics (orange points) exhibited substantial overlaps, thereby substantiating the efficacy of the LDA topic extractor.

The Content Analysis (CA) was conducted to illustrate the relationships between the assigned topics and the grouped years. The size of the orange bubbles indicates the number of articles associated with each time-period, while the size of the blue bubbles indicates the number of articles associated with each topic. The closer the year and topic bubbles are to each other, the stronger their association in terms of thematic proximity.

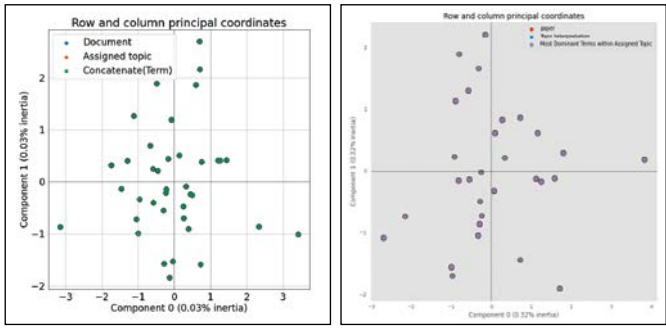


Figure 4: MCA-Analysis showing the proximity of article keywords, topic and terms (Marketing Science and Metaverse)

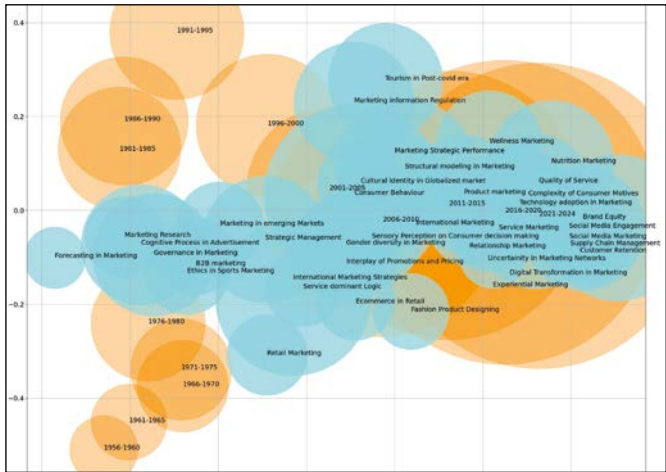


Figure 5: CA-Analysis – Marketing Science

While the initial 40 years of research focused on structural and strategic aspects of marketing, the subsequent 40 years have witnessed a paradigm shift toward consumer-centric and behavioral models, with an escalating emphasis on digital marketing and interactive platforms. This interplay between systematic efficiency and human-centered engagement underscores the dual nature of marketing. Looking ahead, the convergence of these dimensions suggests that AI-driven analytics, behavioral insights, and ethical consumer engagement will define the next phase of marketing evolution. The findings of this research indicate that the integration of cybernetics and complexity sciences in marketing – balancing data-driven precision with consumer experience – could become a pivotal area for future exploration.

The two dimensions of the map in Figure 5 can be interpreted as follows. The horizontal dimension separates older topics (on the left) from newer ones (on the right), except for some themes, which were established during the 1990's. The vertical axis delineates the focus of the topics, with a qualitative assessment emphasizing “Hybrid Spaces”, “Cyber-Physical Interaction”, “Business Model Innovation”, and “Hybrid Design”. These dimensions reflect the “poles” of topical orientation within the Metaverse literature. The combination of these two dimensions provides insights into the relationships between the topics.

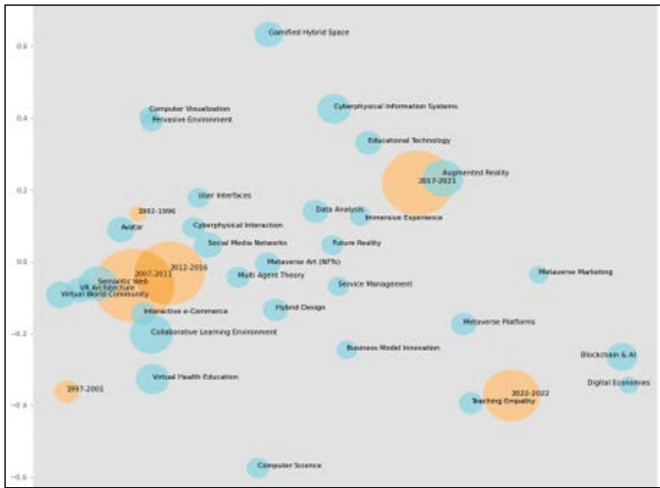


Figure 6: Content Analysis - Metaverse

#### 4 Discussion

While this research confirms Yadav’s [3], [4] observations on the nature of the decline of the conceptual articles and the lack of indigenous themes in marketing [5], this chapter still has given the evidence that the contributions of conceptual only articles have been essential in addition to the quantitative papers. Here call for action for the peers could be given that there is a clear necessity of additional theoretical contributions that would deliver solid impulses to the quantitative-based and consumer-behavior-driven research to expand their themes in the image of foundational marketing aspirations such as the dimensions of establishing sustainability [6] and mindful consumption [7]. These are sufficient reasons why it is essential that marketing establishes itself as a field of managerial science and (digital) humanities to deliver a foundational and integrated framework for marketing within the domain of the Metaverse, where many contemporaneous technologies meet the essence of the cyber-physical reality.

The Metaverse is a holistic space with many solid opportunities for diverse fields. Especially for the field of marketing many contributions could be made to correct the contemporary disjoint and fracture with the field. The key topics discussed here are not exclusive but deliver a solid platform for reflection for the scholars in the field and the practitioners developing actively the essence of the waves on innovation in the future.

#### 5 Towards an Integrative Model of Marketing

The new role of marketing is based on four strategic pillars. These pillars are intended to reposition marketing as a foundational discipline shaping global digital societies. It is essential that it transcend its role as a mere advertising medium. Therefore, five dimensions must be embodied:

- Aligning marketing activities with nature and sustainable conduct
- Seeing marketing is not only relevant in a market but moreover the global digital cyber-physical reality as the domain of marketing
- The notion of human aspiration as understanding the digital native culture, while working the globalization of totality
- Marketing must capture the essence of customers beyond pure selling and USP.
- As technology is the essence of our world and how man is un-concealing artefacts that shape the human condition, especially in the age of Anthropocene, marketing must design a value perception of technology in Aldersons postulated call, from the marketing lens.

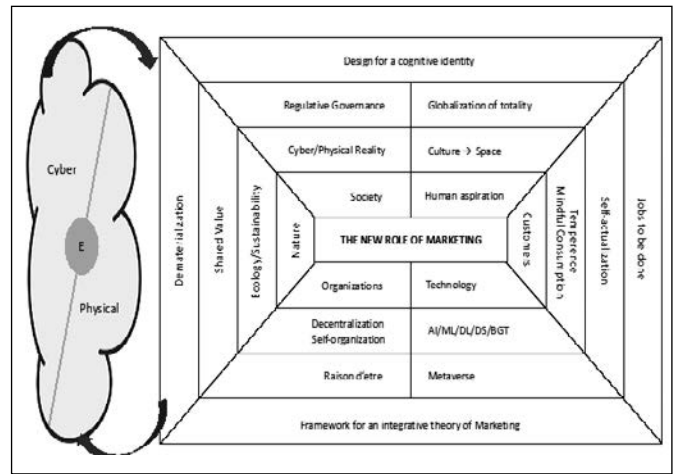


Figure 7: A Theoretical Framework for the New Role of Marketing in Cyber-Physical Realities

Organizations must transition from prioritizing shareholder value to a marketing raison d’être, embracing decentralized value that is aligned with societal and stakeholder interests. Marketing must address complexity, integrating indigenous theories and ecological values with the digital-native environmental consciousness enabled by global connectivity.

#### 6 Conclusion

This research addresses fundamental questions about managing marketing through luxury semantics in the Metaverse and evaluates marketing science’s preparedness for current disruptive challenges. Historical analysis reveals that marketing science lacks readiness to address core challenges including technicity, sustainable product design, governance systems, organizational modeling, and foundational cognitive identity. The field has lost its cognitive identity by focusing on peripheral issues while claiming holistic managerial relevance. In response to these challenges, the proposed solution (figure 7)

involves designing a holistic, integrative approach to establish marketing's societal relevance and disciplinary viability. Metaverse functions as a marketplace of ideas and experience innovation platform that enables sustainable marketing through dematerialization. It represents the convergence of cyber-physical spaces creating unified reality. Marketing science alignment with the Metaverse can occur when traditional marketing discovers its *raison d'être* within cyber-physical realities. This research presents a six-part alignment model, with in providing an integrative model for marketing to address essential dimensions and proactively manage future disruptions. Luxury emerges as phenomenological truth of value essence, uncovered through abductive reasoning. *Habitus*

and cultural capital within the fifth cultural space enable cultural experience. Luxury, taste, and experiential practice constitute prerequisites for luxury phenomenology as human endeavor and need. "Shared value" provides the foundation for civilizing capitalism. Marketing must transcend pure advertising and shareholder value enhancement toward worthier ideals. Organizational theory must structure firms with purpose respecting natural viability laws and environmental symbiosis as preconditions for robust, inspirational futures.



Scan this QR code to access high-resolution figures and other figures from this research paper:

## References:

- [1] L. Vargo, & F. Lusch, "Evolving to a New Dominant Logic for Marketing", *Journal of Marketing*, 68(1), 1-17, 2004.
- [2] O. Furrer, H. Thomas & A. Goussevskaia, "The Structure and Evolution of the Strategic Management field: A Content Analysis of 26 years of Strategic Management Research", *International Journal of Management Reviews*, 10(1), 1-23, 2008.
- [3] S. Yadav, "The Decline of Conceptual Articles and Implications for Knowledge Development", *Journal of Marketing*, 74(1), 1-19, 2010.
- [4] S. Yadav, "Reimagining marketing doctoral programs", *AMS Review*, 10(1-2), 56-64, 2020.
- [5] S. Hunt, "Advancing marketing strategy in the marketing discipline and beyond: from promise, to neglect, to prominence, to fragment (to promise?)", *Journal of Marketing Management*, 34(1-2), 16-51, 2018.
- [6] M. Lunde, "Sustainability in marketing: a systematic review unifying 20 years of theoretical and substantive contributions (1997-2016)", *AMS Review*, 8, 85-110, 2018.
- [7] J. Sheth, N. Sethia & S. Srinivas, "Mindful consumption: a customer-centric approach to sustainability", *Journal of the Academy of Marketing Science*, 39, 21-39, 2011.

## KONTAKT



**Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)**

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

q.kamran@oth-aw.de



**Patrick Baretto**

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

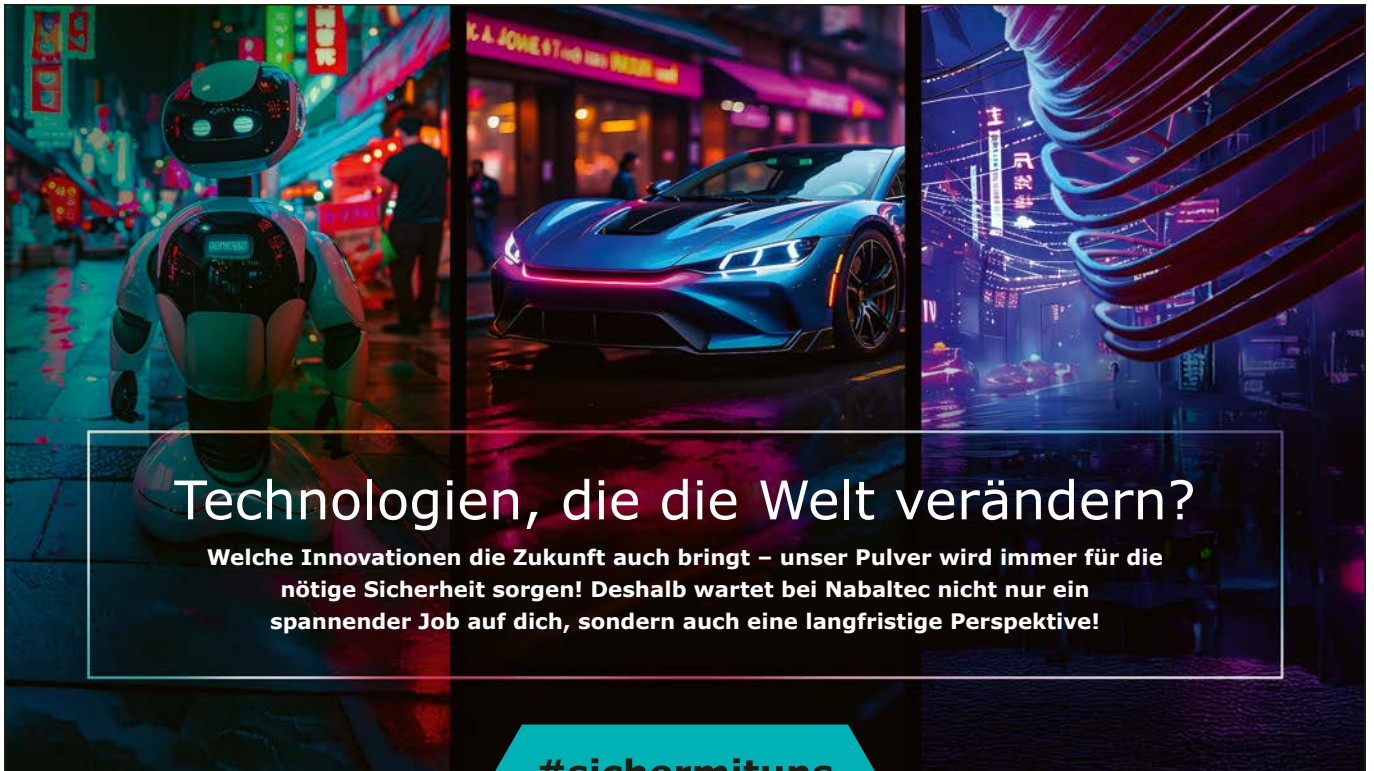
p.baretto@oth-aw.de



**Prof. Dr. Marcus Becker**

International School of Management (ISM)  
University of Applied Sciences  
Quantitative Methods of Business  
Information Systems  
Otto-Hahn-Straße 19  
44227 Dortmund

marcus.becker@ism.de

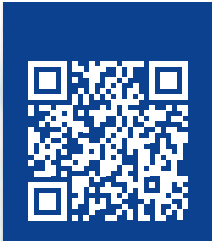
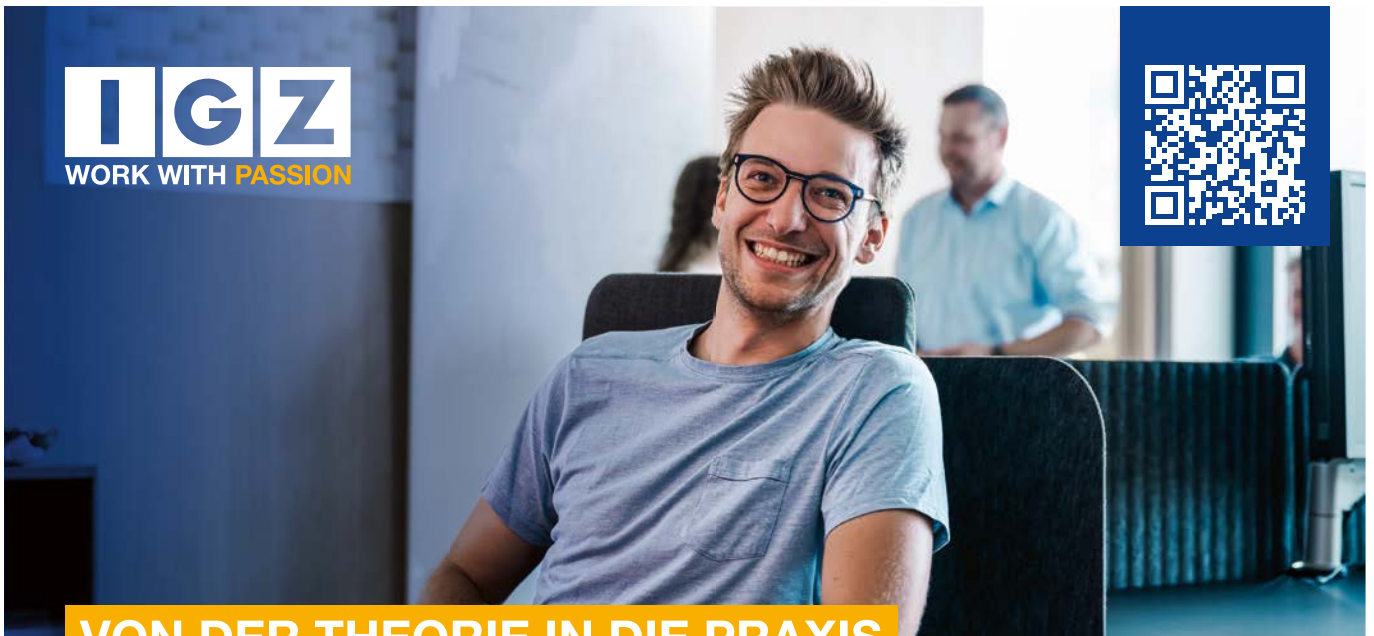


**Technologien, die die Welt verändern?**  
 Welche Innovationen die Zukunft auch bringt – unser Pulver wird immer für die nötige Sicherheit sorgen! Deshalb wartet bei Nabaltec nicht nur ein spannender Job auf dich, sondern auch eine langfristige Perspektive!

**#sichermituns**



Jetzt bewerben!  
[nabaltec.de/karriere](https://nabaltec.de/karriere)



**VON DER THEORIE IN DIE PRAXIS**

- (Pflicht-)Praktikum / Werkstudententätigkeit
- Abschlussarbeiten
- Traineeprogramm für die SAP Softwareentwicklung
- Traineeprogramm Sales Manager:in
- Direkteinstieg SAP Softwareentwicklung

**#myjobismy passion**

Mach auch du deine Leidenschaft zum Beruf: [karriere.igz.com](https://karriere.igz.com)

## History of Management Science: A Quest for Identify, Raison D'être and Future

### Zusammenfassung

Das Diktum „Erkenne dich selbst“ (Sokrates) findet im Zusammenhang mit unserer Erforschung der Geschichte des Managements tiefgreifende Resonanz und unterstreicht die entscheidende Bedeutung von historischem Bewusstsein, Identität und Daseinsberechtigung bei der Entscheidungsfindung. Das Fehlen von historischem Bewusstsein und die anfängliche Vernachlässigung normativer Prinzipien haben zu einer weit verbreiteten Skepsis hinsichtlich der Legitimität und Relevanz des Managements beigetragen. Theorien, die von ihrem historischen Kontext losgelöst sind, haben sich als wenig wirksam bei der Steuerung praktischer Entscheidungsprozesse erwiesen. In diesem Beitrag wird eine historische Untersuchung der Entwicklung des Managements vorgenommen, indem über 80 Jahre veröffentlichte Literatur aus den 130 führenden Fachzeitschriften mit insgesamt 367.896 Artikeln analysiert wird, um eine objektive und pluralistische Geschichte des Managements zu entwickeln. Wir haben einen neuartigen angewandten historischen Ansatz verwendet und den KNIME-Analyse-Workflow für fortgeschrittene Textanalyse und Dekonstruktion eingesetzt. Unsere Ergebnisse zeigen bisher verborgene historische Narrative auf, die das Verständnis der Managementwissenschaft verbessern und den Weg für weitere wissenschaftliche Forschung ebnen. Durch die Rekonstruktion der Geschichte als eine Reihe miteinander verbundener Fragmente und die Synthese dieser Erkenntnisse haben wir die Identität durch den konzeptionellen Rahmen des Management-Dispositivs neu definiert. Diese Neukonzeption bietet einen neuen Zweck für den Bereich des Managements, indem sie einen zukünftigen Weg aufzeigt und die Relevanz aufrechterhält. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit, historisches Bewusstsein und retrospektive Sinnfindung zu fördern, um die Identität und Daseinsberechtigung des Managements kontinuierlich neu zu definieren und damit seine Legitimität und Relevanz in einem sich ständig weiterentwickelnden Umfeld zu bewahren.

### Abstract

The dictum “know thyself” (Socrates), finds profound resonance in the context of our exploration of the history of management, underscoring the critical importance of historical consciousness, identity, and *raison d'être* in decision-making. The absence of historical awareness and the initial oversight of normative principles have contributed to a pervasive sense of skepticism regarding the legitimacy and relevance of management. Theories divorced from their historical contexts have demonstrated limited efficacy in guiding practical decision-making. This paper undertakes a historical examination of the evolution of management by analyzing over 80 years of published literature from the top 130 journals, encompassing 367,896 articles, to develop an objective and pluralistic history of management. We employed a novel applied history approach, using KNIME analytics workflow for advanced textual analysis and deconstruction. Our findings reveal hitherto concealed historical narratives that enhance the understanding of management science and pave the way for further scholarly research. By reconstructing history as a series of interconnected fragments and synthesizing these insights, we have reimagined the identity through the conceptual framework of the management dispositive. This reconceptualization offers a renewed purpose for the management domain, charting a future trajectory and maintaining relevance. The study underscores the necessity of cultivating historical consciousness and retrospective sensemaking to continuously redefine the identity and *raison d'être* of management, thereby preserving its legitimacy and relevance in an ever-evolving landscape.

## 1 Introduction

History is not merely a collection of events; rather it serves as a cornerstone of intellectual and societal development, thereby linking the past, present, and future [1]. History fosters a cognitive identity that involves the examination of assumptions, practices, and the broader contexts in which they arise and operate, providing a basis for deeper oblique illumination of l’avenir. Despite its considerable potential, management as a discipline has frequently neglected critical examination of its history, instead it has focused on the 4Rs of relevance, recency, results, and redemption [2], and intellectual influence. This paper proposes a reorientation towards management’s historical consciousness through contemporary discourse and posits the practical value of historical perspective. The findings underscore the critical dilemmas within the discipline, including the early neglect of normative management principles, the fragmentation of knowledge, and the proliferation of theoretical models that are divorced from real-world contexts and complexities. This study further, prompts a reflection on the raison d’être of management as a discipline, particularly in light of management-created crises and the transformative impact of emerging technologies on the evolving landscape of decision-making and organizational governance. The development of the Trivergence model that effectively integrates into the various elements of “Management Dispositive” [3], while maintaining its individual and group identity, is the hallmark of this paper.

## 2 Research Design

The history of management, akin to other fields of study, is a vast and formidable subject to encapsulate in its totality. To formulate a comprehensive history of the discipline of management, this research undertakes a meticulous examination of extant publications, the preservation of intellectual capital, and the transmission of habitus, doxa, and illusio throughout the evolution of management as a discipline over the past 80+ years.

All topics analyzed within the scope of this paper went through thorough ML Algorithms analysis to establish the historical account of the field of management and in-depth Content Analysis (CA). The authors have analyzed a total amount of textual data (titles, keywords and abstracts) of 376,896 articles from 130 journals, using unsupervised MLA to establish an objective account of the historical narrative. Thus, the study combined the scholarly analysis of the “lay of the land” in management with the techniques and tools of AI for greater precision and objectivity in establishing unbiased labelling of “topic-keyword relationships”.



Figure 2: Word Cloud Term Weight – topic-keyword relationships (1945-2024)

Data Import	Pre-processing	Topic Detection via LDA	Grouping	Visualization
<ul style="list-style-type: none"> <li>A comprehensive selection of 367,896 articles curated from 130 distinguished journals in the domain of management.</li> <li>The creation of an exhaustive Excel list encompassing all pertinent information such as authors, titles, journals, keywords, abstracts, publication years, citations, and annual citations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coding of keywords</li> <li>Tokenization of information about title, authors, and keywords, abstracts</li> <li>Punctuation erasure</li> <li>Filter out numbers</li> <li>Deletion of words with less than 3 characters</li> <li>Creation of stop list to exclude specific common words</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Single-parallel distributed implementation of LDA in KNIME for detecting the topics most relevant to the research project</li> <li>The node uses the MALLET topic modelling library.</li> <li>The generation of 60 topics is based on sensitivity analysis of 5 terms each.</li> <li>Alpha = 0.01 and Beta = 0.001 =&gt; fine granularity.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The grouping of topic terms</li> <li>The weighting of the qualitative evaluation</li> <li>The pivoting of topics over years</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The MCA was implemented to ascertain the correlation between topic terms and keywords</li> <li>Time series plots with trendlines demonstrate the number of assigned articles per topic over the course of several years.</li> <li>CA analysis is employed to illustrate the interrelation of assigned topics to grouped years and journals.</li> </ul>
<b>Main Interpretations resulting from the analyses</b>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>MCA analysis provides precise results in accordance with the methodology employed.</li> <li>Key management discipline topics are identified as the most prevalent subjects in the past, present and potential future, as determined by trend lines.</li> <li>The thesis has examined the history of management through critical evaluation of published articles over the past 80+ years.</li> <li>The core strength of the discipline lies in its ability to overcome challenges and adapt to changes, but it is fractured from within. The paucity of historical consciousness and the overreliance on specialization have, to a considerable extent, undermined the holistic nature of management.</li> <li>The present research endeavours to establish a designerly path toward unveiling the new frontier of the history of management and its periodization. This approach emphasizes historical consciousness and introspection to reimagining the identity and purpose of the management science.</li> </ul>				

Figure 1: Methodology of the Analysis

### 3 Analysis

Multiple Correspondence Analysis (MCA) validates quantitatively the concordance between real published article keywords and topic-term associations. It allows the researcher to explore and analyze multi-way tables to detect structure in the relationships between nominal variables. The keywords (blue points) associated terms (green points), and subordinate topics (orange points) exhibited substantial overlap, thereby substantiating the efficacy of the LDA model.

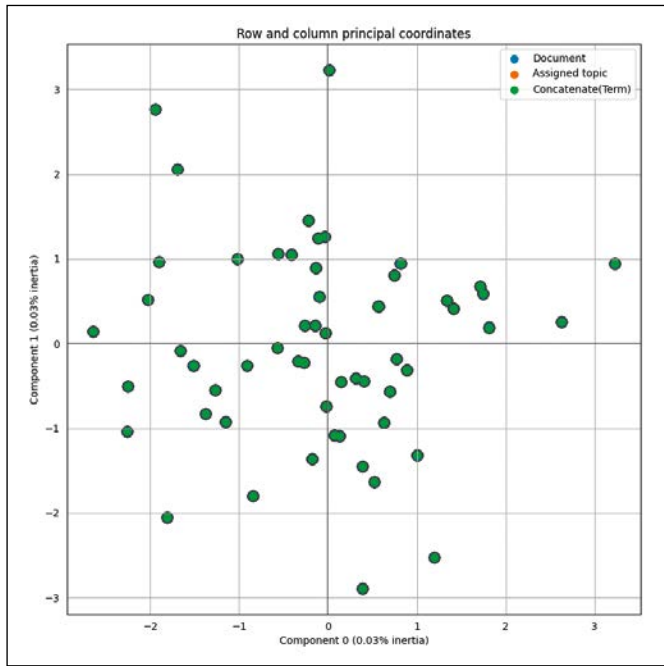


Figure 3: Multi Correspondence Analysis (1945-2024)

The Content Analysis (CA) depicted in Figure 4 illustrates the relationship between the assigned topics and the grouped years. Based on our findings, the history of management can be divided into four distinct eras, each of which is linked and intertwined with the next by transformative changes that have shaped management as a legitimate discipline and applied field. These eras reflect the evolution of management thought, institutional development, specialization and ongoing debates about convergence or divergence in the field.

#### i. Founding Era of Management (until 1945)

At the turn of the 20th century, the wealth of nations was increasingly entrusted to an emerging discipline—management. This discipline, rooted in the principles of scientific efficiency, human relations and social systems theory, was focused on developing the shop floor structures (the bottom of the pyramid). This period laid the intellectual and practical foundations of modern management and set the stage for the systematic study and institutionalization of management practices in the decades that followed.



Figure 4: Periodization of the History of Management based on Content analysis (1945-2024)

#### ii. Era of Institutionalisation – also called Progressive Era (1945-1989)

Post the WWII, the prevailing management philosophy was characterized by a structuralist perspective, which posited that organizational effectiveness is optimized when roles, responsibilities, and reporting lines are clearly delineated based on hierarchical structures [4]. Postmodern thought had become the dominant intellectual paradigm in the West, shaping economic, social and political discourse. The field of management science also underwent a significant transformation, the rise of managerialism, an ideology that emphasized planning, administration and coordination, shaping management thinking, reflecting the belief that economic stability, and growth could be achieved through systematic managerial control. The intellectual climate had shifted decisively towards a market-driven approach, framed in terms of competition, efficiency and deregulation rather than centralized coordination. Data-Driven Decision-Making and Competitive Market Structures became dominant topics, reflecting the broader shift to supply-side economics and the emphasis on maximizing shareholder value.

#### iii. Era of De-institutionalization – also known as Era of Crisis (1990-2019)

The expansion of global markets, advances in technology and the rise of the service sector reinforced the centrality of management in coordinating large-scale production and distribution, embodying the triumph of managerial capitalism. As the 20th century drew to a close, however, the very forces that had brought management to prominence began to undermine its legitimacy. A series of crises – financial scandals such as Enron (2001) and

WorldCom (2002) – exposed the vulnerability of corporate governance and managerial ethics. The global financial crisis of 2008 further shattered confidence in traditional management paradigms as excessive risk-taking, short-term profit maximisation and deregulated markets led to systemic collapse [5]. The very mechanisms that had enabled global economic expansion – financialization, shareholder primacy and neoliberal management practices – were now being scrutinised for their role in generating instability and inequality [6].

#### iv. Era of Convergence, Divergence or Crossvergence – an era of re-institutionalisation? (2020-?)

The fragmentation of management thought in the late 20th and early 21st centuries led to increasing specialization and the pursuit of an indigenous management theory – one rooted in contextual realities and human-centred principles – was largely overshadowed by an over-reliance on predictive and scenario analysis based solely on quantitative data [7]. This myopic approach became glaringly apparent during the COVID-19 pandemic, when traditional predictive models failed to anticipate the scale and complexity of the disruption. The inability to predict systemic risk led to the mass elimination of companies and start-ups, many of which have not returned to pre-pandemic stability years later [8].

### 4 Reconstructing the Identity of Management Science

The cognitive identity of management science is shaped by historical narratives and contextual influences, which can only be established through what Foucault termed the “Dispositive” (apparatus) – a strategic network of discourses, institutions, regulatory decisions, and social practices that shape knowledge and power relations [3]. The multifaceted array of elements within the historical context is manifested in the discourses of social interaction, thereby guiding the evolution of management theories and practices. This Foucauldian perspective facilitates a critical examination of the foundations of management science, culminating in a more contextualized and historically informed identity that enhances its relevance and legitimacy in addressing contemporary organizational complexities.

### 5 Raison D’être of Management Science

What was conceived as a mediatory role between the owners, unions and employees, the role of management science has evolved significantly to encompass a broader spectrum of responsibilities. However, the core nature of the role remains unchanged – balancing the diverse and often conflicting needs, wants and demands of multiple stakeholders. The time dimension adds another layer of complexity. Management science is responsible not only

for addressing immediate concerns, but also for ensuring future needs, often making decisions under uncertainty while maintaining ethical integrity.

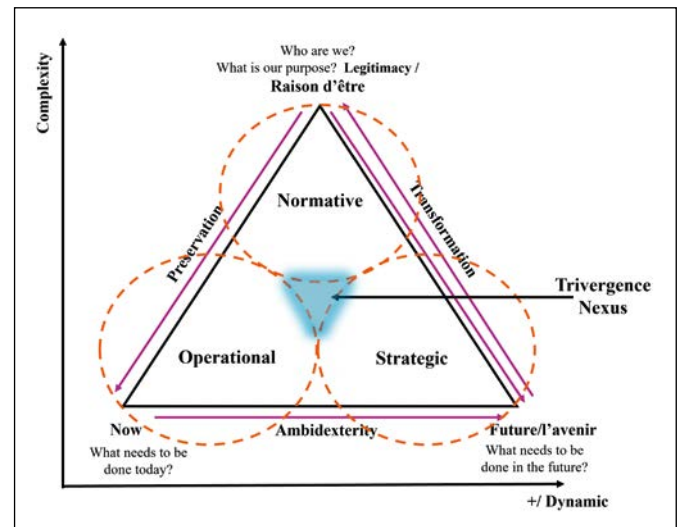


Figure 5: Trivergence Framework (Enhanced DWA model)

The Trivergence Nexus (Figure 5), is a framework that acknowledges the interplay between stability and change, integrating the dimensions of managerial decision-making (operational, strategic, and normative) into a time-space continuum. This framework represents the dynamic intersection and complex interplay of convergence, divergence, and crossvergence in managerial decision-making. The Trivergence Nexus transcends the conventional limitations, both internally and externally, by virtue of its recursive multi-layer operability in a self-organized manner. This transformative capacity of the Trivergence Nexus, as articulated by Ashby [9], signifies a transition from a state of separation to one of interconnectedness, encapsulating a paradigm shift “from parts separated to parts joint”. The integration of systems theory, complexity science, and decision theory under the Trivergence Nexus framework fosters a holistic and coherent paradigm for the theoretical and practical underpinnings of management.

### 6 Implications for Management Science

Beyond the theoretical implications, Trivergence Nexus has deep managerial applications. It functions as a dynamic decision-making model that balances efficiency (convergence), innovation (divergence), and adaptability (crossvergence). By recognizing the dynamic nature of a business environment, it provides a framework for navigating complexity and uncertainty, and underscores the need to make sustainable, resilient, and moral decisions, especially in an era of rapid technological disruption, where decisions should address immediate operational needs and long-term strategic vision.

This paradigm goes beyond the traditional model to embrace a multidimensional, multi-principle, and

trans-disciplinary approach to management. This challenges traditional assumptions of balance and provides a more fluid, adaptive perspective for management decisions. By recognizing the interaction of many forces and their dynamic nature, Trivergence Nexus establishes itself as a comprehensive model that reflects the realities of modern organizational management.

## 7 Conclusion

The present study sought to evaluate the effectiveness of the historical consciousness, identity, and *raison d'être* on managerial decision-making. The findings revealed the absence of evolutionary awareness, leading to a dearth of trust and questioning the legitimacy and relevance of the domain. The goal was to provide an authentic, objective and pluralistic perspective of the domain, addressing the limitations of traditionalist and post-foundationalist

theories of the history of management. The authors' approach transcended the limitations of conventional analysis by examining the history not as a monolithic narrative, but as a series of interconnected fragments, meticulously woven into a cohesive flow – from parts separated to parts joined – to achieve a holistic understanding. By synthesizing the insights from the historical evolution, we reimagined the identity of management through the lens of management dispositive and the total environment. This refined identity enabled us to chart out a future trajectory for management domain, grounded in a renewed *raison d'être* to maintain relevance.

Scan this QR code to access high-resolution figures and other figures from this research paper:



---

## References:

- [1] J. Tosh, "The Pursuit of History: Aims, Methods and New Directions in the Study of Modern History", (6 ed.), New York: Routledge, 2015.
- [2] G. Burrell, "Pandemonium: Towards a Retro-Organization Theory", London: SAGE Pub. Ltd., 1997.
- [3] M. Foucault, "Power/Knowledge – Selected Interviews and Other Writings, 1972-1977", (C. Gordon, L. Marshall, J. Mepham, & K. Soper, Trans.), New York: Pantheon Books, 1980.
- [4] A. Chandler, "Strategy and Structure: Chapters in the History of the Industrial Enterprise", MIT Press, 1962.
- [5] P. Krugman, "The Return of Depression Economics and the Crisis of 2008", New York: W. W. Norton & Company, 2009.
- [6] E. Stiglitz, "The Price of Inequality: How Today's Divided Society Endangers Our Future", New York: W. W. Norton & Company, 2015.
- [7] G. March, "Rationality, Foolishness, and Adaptive Intelligence", *Strategic Management Journal*, 27(3), 201-214, 2006, doi: <https://doi.org/10.1002/smj.515>.
- [8] E. Brynjolfsson, J. Horton & et al., "COVID-19 and Remote Work: An Early Look at US Data", Cambridge: National Bureau of Economic Research, 2020, <https://www.nber.org/papers/w27344>.
- [9] W. Ashby, "Principles of the Self-organizing System", Pergamon Press, 1962.

## KONTAKT



**Patrick Baretto**

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

[p.baretto@oth-aw.de](mailto:p.baretto@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)**

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

[q.kamran@oth-aw.de](mailto:q.kamran@oth-aw.de)

# The History of Design Thinking - From Pragmatism to Phenomenology

## Zusammenfassung

Der Artikel erweitert die Perspektive in der Literatur zum Design Thinking aus kontextuellen, philosophischen und historischen Blickwinkeln und integriert zusätzliche wesentliche wissenschaftliche Beiträge zu diesem Gebiet. Da Design Thinking auf der logischen Weltanschauung des Pragmatismus basiert, wird ein kurzer Überblick über die Geschichte des Pragmatismus gegeben. Darüber hinaus schlagen wir vor, dass eine Synergie zwischen Pragmatismus und Phänomenologie als grundlegende philosophische Brücke für Design Thinking notwendig ist, um zu fruchtbareren Forschungen und praktischen Beiträgen auf diesem Gebiet beizutragen. Die Neuheit des Artikels liegt in der erweiterten Sichtweise des Pragmatismus auf der Grundlage phänomenologischer Forschung, die bisher selten auf Design Thinking angewendet wurde und daher Designern neue Wege eröffnet, ihre theoretischen und managementbezogenen Denkweisen aus einer ganzheitlichen und erweiterten Perspektive zu bereichern.

## Abstract

The paper extends the perspective in the literature of design thinking from contextual, philosophical and historical perspectives and integrates additional essential scientific contributions to the field. As design thinking is founded within the logical Weltanschauung of pragmatism, a brief history of pragmatism is described. Furthermore, we suggest that a synergy between pragmatism and phenomenology as a foundational philosophical bridge for design thinking is necessary to contribute to the field for more fruitful research and practical contributions. The novelty of the paper is the extended view of pragmatism based on phenomenological research, which has rarely been applied to design thinking and therefore opens new pathways for designers to enrich their theoretical and managerial mindsets from a holistic and extended lens.

---

## 1 Introduction

Design thinking (DT) and its development, founded in the tradition of practicalism and pragmatism [1], can profit much from self-reflection, not only with regards to explaining to new pragmatists the notion of what DT is classically known for in terms of the consequences of their ideas and beliefs but moreover from the construction of beliefs, which “... distinguishes doubt from belief; hence, there is a practical difference. Our beliefs guide our desires and shape our actions” [2]. Design, however, as a method of inquiry is holistic and unifies the above-mentioned themes in terms of a declarative logic and truth of being concerned with what ought to be [3] with

respect to a postulated artifact that needs to be unconcealed (entborgen). The design truth is different than the scientific truth. Science requires a truth of what-is-out-there, finding relations and causalities of existing phenomenon in an abstract form. Design, on the other hand, is interested in what ought to be. Designerly inquiry is based on the main question of what can be.

Phenomenology explains that knowledge is achieved by the interactions between designers (researchers) and objects and can thus be seen as a countermovement against positivists, who believe that there is knowledge independent of human perception. Therefore, phenomenological research is considered subjective, inductive,

and dynamic [4], which is a notion that connects very well with the understanding of design as a holistic phenomenon.

According to Davis [5], "... the meaning of things is not inherent in objects but is actually located in the individual's inner life ... The researcher's task is to understand reality as it is, actively and consciously created by subjects, not as a pure entity that exists 'out there'" [6]. Hence, the researcher becomes a designer by the perception of the reality constructed and consequences resulting thereof. To bridge DT towards a phenomenological perception of an experience and meaning epistemology, the paper suggests the description of diverse thought paths. These new pathways for DT implement additional scientific and philosophical views from a rather multi-disciplinary perspective. Design as a field of multi-disciplinary discourse requires a phenomenological approach of meaningfulness and human experience, to applied tools of positivism and empiricism [7], of intuition and hermeneutical thinking [8], and of means and ends [3].

## 2 Pragmatism: a Brief History and its Broader Contemporary Significance

The birthplace of pragmatism can be traced to the exact date of August 26, 1898, when William James held his lecture "Philosophical Conceptions and Practical Results" at the University of Berkeley's Philosophical Union [9]. In this address, James gave a tribute to Peirce for being the founder of pragmatism and expanded on the latter's Popular Science Monthly publication "How to make our ideas clear", by stating: "Beliefs, in short, are really rules for action; and the whole function of thinking is but one step in the production of habits of action. If there were any part of a thought that made no difference in the thought's practical consequences, then that part would be no proper element of the thought's significance" [1], [2].

Peirce, disturbed by the notion of pragmatism, coined the term "Pragmaticism" which he referred to as a term so ugly as to be safe from kidnappers. While the notion of pragma, which means behavior as christened by Peirce [2], is in its essence action-oriented, there are still some differences between the interpretations of the various classic pragmatists. Peirce's pragmatism is more based on a logical principle of deduction, induction and abduction, more as a scientific method, attitude and by fallibilism as Peirce's stance of anti-absolutism against the inherited Hegelian Weltanschauung of idealism. William James, by contrast, puts the notions of experience, consciousness and emotion more into the context of pragmatism; thus, for him, consciousness and feelings were more than what could be expressed by language. Dewey, on the other hand, observed experience rather as the means and ends of inquiry, constructing on the

esthetic experience of art as language and continuity in a natural environment as the mantra of the concentration of pragmatism [10]. Later, developments in pragmatism were shaped by the so-called neo-pragmatists and based on the linguistic turn [11], epistemological behaviorism [12], anti-skepticism, embrace of fallibilism [13] and rationalist approach [14].

We extend Brandom's observation of the Heideggerian phenomenological-pragmatist status of "Being and Time" [15] to the publication of "The Question Concerning Technology". He constructs a bridge for design research in terms of "Ge-stell" (Artifact) as design activity (enframing, unconcealing). "Enframing means the gathering together of that setting-upon which set upon man, i.e., challenges him forth, to reveal the real, in the mode of ordering, as standing-reserve. Enframing describes the way of revealing which holds sway in the essence of modern technology and which is itself nothing technological" [16].

The logical extensions of pragmatism above account for the broader significance of pragmatism; however, it is still difficult for any author to avoid lacuna; hence, from the design perspective, one can align the contributions of all the essential pragmatists through a Darwinian analogy of interaction of the subject with the environment; thus, whatever works does so in the sense of an esthetic unity of experience and meaning by the ubiquitous interaction of practice and continuity. This notion is observed by Simon [3], who states: "Biologists are familiar with this property of adaptive systems under the label of homeostasis. It is an important property of most good designs, whether biological or artifactual". Thus, based on this analogy, designers are cultivators of designing the eigen behaviors (internal states) of the social systems under their control, embracing the cybernetic argument incorporating the model of the artifact or a functioning reality designed, wherein a firm's navigator maintains organizational homeostasis [17], [18].

Schwanger [19] underpins this notion in "Design for viable organizations" by substantiating that design defines the diagnostic power of organizations. Hence, based on Beer's viable system model (VSM) [18], the design of the structural conditions of homeostasis *avant la lettre* determines the long-term viability and success of organizations. Designers, therefore, first design the organizations, which based on the integrity of the structural dynamics and interaction of their internal parts generate eigen behaviors that equate with the perturbations of the environment in terms of requisite varieties [20]; thus, *ex ante* are creating the conditions of homeostasis and autopoiesis. Schwanger's viable design perception sees organizations as a tool of diagnosis structured within the conditions that the VSM delivers. This dimension was also substantiated by Gälweiler under the term

“pilot-control of success” (Erfolgsvorsteuerung). Hence, the designer of a system or organization is a pragmatist by default in the sense that navigating an organization requires a designerly interpretation of generating functioning conditions “a priori” to cope with emergent phenomena [21].

### 3 Central Issues in Design Thinking

From the launch of research-based journals in design such as *Design Studies* (1979), *Design Issues* (1984), *Design History* (1988), *Research in Engineering Design* (1989) and *Languages of Design* in 1992, the term has been much popularized, especially since it was originally introduced by Simon [3]. According to Cross [22], “design practice does indeed have its own strong and appropriate intellectual culture ... we must avoid swamping our design research with different cultures imported either from the sciences or the arts”.

While this notion of constructing design as the third paradigm of inquiry goes back to Archer’s original definition, first introduced at the 1980 Design Society Conference, credit for popularizing design as the third paradigm of inquiry is also given to Cross. “Design research is systematic inquiry whose goal is knowledge of, or in, the embodiment of configuration, composition, structure, purpose, value, and meaning in man-made things and systems” [23]. Simon [3] observes: “Everyone designs who devises courses of action aimed at changing existing situations into preferred ones. The intellectual activity that produces material artifacts is no different fundamentally from the one that prescribes remedies for a sick patient or the one that devises a new sales plan for a company or a social welfare policy for a state. Design, so construed, is the core of all professional training; it is the principal mark that distinguishes the professions from the sciences. Schools of engineering, as well as schools of architecture, business, education, law, and medicine, are all centrally concerned with the process of design”.

### 4 Design Thinking Extending the Dimension

We treat DT as a different culture from science and the arts in terms of “designerly ways of knowing, thinking, and acting”, which has been distinguished in its own right. Subsequently, the design path of inquiry as the intellectual structure of the field as a designerly way of knowing and as a reflective practice was paved [22]. Furthermore, “Design” with a big “D” as a *Weltanschauung* of inquiry made a huge impact; thus, it was christened “the third area” of education to be placed among science and humanities [23]. Many scholars advocate for a holistic approach, as “... a combination of science thinking and design thinking is better than either alone as a source of advice” [24].

The constructivist epistemology developed as the design of a constructivist paradigm of knowledge; hence, knowledge is not ready made, and it is a continuous and ubiquitous process of organizing our knowledge that creates knowledge by action and adaptation, which are the founding pillars of design and design thinking today [25]. Thus, the iterative loops of the hermeneutics of trial and error and phenomenologically constructing of artifacts [16] and reflecting upon the question of “how can?” [26] are the essence of design.

The construction of reality is the design of the real embedded in creativity that the ubiquity of thinking and acting bridges as a holistic construct. Thus, constructivism leads to a better understanding of creativity, which is an essential skill in DT. “Productive artists, inventors, and scientists do not depend critically on accidents, even if they occasionally profit from such events. The competent creative person can, within limits, engage and disengage creative thought and activity at will. In such people, creativity can be properly considered as an intellectual aptitude that supports purposive behavior. I submit that it is this type of creativity – purposive innovation by players that is the most appropriate goal for us as designers. It is here that it may be useful to return to Piaget’s theoretical work on adaptation ...” [27].

Bourdieu builds on the Deweyan notion of habit [28] as a concentrated form of inherited action-ability preceding the new forms that will be constructed a priori as a structural intelligence within the dimension of the dynamics of judging and doing. The construction of new forms requires design; hence, from the form of habits construed as the inheritances of cultural forms in terms of habitus, the quality of seeing and observing of future forms arises. This brings forth a second order understanding of how to design the process of designing into the discourse of intellectual consideration. Hence, designing artifacts for use by others requires second-order logic (*Erkennen*) and understanding understanding [29].

We build on the foundations laid in second-order cybernetics, as science defines its subject matter with the aim of developing theories, relations, variables and laws that explain its fundamental questions – excluding the inquiring scientist (designer) from these explanations (artifacts) [29]. To consummate the elegance and precision of the second-order designerly *Weltanschauung* of scientific discourse, we align with the founding premise that objectivity is the delusion that observations could be constructed into a phenomenon of a practical value without a meaning-giving observer [30].

Design, as stipulated so far, was therefore derived to bring this gap towards a harmonic closure of an observing science by coining it as “the science of artificial”. Structuring the implications of the fields in this way

enhances the understanding of differences between each field. Not only is their goal significantly different in most cases, justifying the separation and emergence of design as an additional field in extension of the previously existing ones but also the distinction of values and measures substantiates the necessity and advantage of combining several fields when searching for answers to the most complex problems [24]. Thus, organizational lens design thinking embraces the bridge between first-order and second-order stipulation. The foundation of the designer's work is based on the recursive nature of subjectivity and objectivity in a hermeneutic loop. This notion of constructing the logic of observing the designer's own observing is, therefore, the foundation, whereupon the notion of experience as a stream of connecting properties enters the loop by stipulating the direction of observation towards a favorable future and design. This is the basis of human endeavor, the essence of evolution and the logic of emergence; thus, we structure the structuring perception of all structures by asking the question of "how can", wherein we unite with ourselves in a designerly way of enquiring and knowing.

## 5 Phenomenology and Design Thinking – A necessary Synergy

The notion of experience and meaning by the observer builds on how the designer must enter the room of the observed phenomenon within the iterative loop of unconcealment, which has been studied profoundly by Heidegger [15] and Husserl [31]. This paves the way for a unique direction in design thinking to observe the field's development from a phenomenological *Weltanschauung*. According to Husserl [31]: "The impulse to research must take its start not from philosophies but from issues and problems". Design research is the synergy of phenomenon, which takes shape in meaning and experience to creatively solve problems in the pragmatic tradition extended by phenomenology.

For DT, applying phenomenological *Weltanschauung* comes naturally as constructed by Husserl; hence, design comes from creating constructs of the design into a recursively related system towards a final structure. Heidegger as a pragmatist in the Wittgensteinian sense was a linguistic designer (*Spracherfinder*), wherein he built on Husserl's founded tradition of philosophy as a strict science. For him to build on the existential philosophy of phenomenology laid-out by Husserl and the design of the language in which he coined the terminus a quo of "Da-sein" (being there), has implications for DT. Da-sein is the ubiquitous DT, whereupon subjects can relate to a constructed reality and design. The very notion of design is to observe meaning a priori to a phenomenon or to a construed artifact. No design can take place unless a meaning has been related to the observation and the construction. However, no design will still take place when the

structural capacity of the designer of being able to relate meaning to a phenomenon is lacking in the subject, thus making the notion of experience existentially relevant. Da-sein is the unique terminus that unifies both terms for DT. According to Heidegger [16], "The disclosedness of the Da in understanding is itself a manner of the ability of Da-sein to be (*Seinkönnen*). The disclosedness of being in general lies in projecting-openness (*Entworfenheit*) of Da-sein's being unto the for-the-sake-of-which and simultaneously unto meaningfulness (*Bedeutsamkeit*) [world]. An understanding of being is already anticipated in the projecting-opening unto possibilities". What makes the notion of "Da-sein" essential for a designer is also that it was coined by Heidegger as a philosophy of the epoch of modernity. Da-sein is the construction of the reality of the designer based on the epochal embeddedness wherein he constructs. The goal is to design forms and *gestalts*, products and services, realities and constructs that work and are destined to bring some value for the time in which the designer brings forth meaning. That is essential, hence, all the meanings attached to something are the tale of the epoch, the culture therein that defines value and service in the image of the collective Da-sein, and of a mutual appropriation of historical interpretation of meaning and experience.

## 6 Conclusions

Based on our findings, the recursive nature of DT treats the mind and body problem not purely from the Cartesian concept of duality but instead from a ubiquitous relation between cognition and action as a whole. This relationship is not new. Kant's normative conception of activity of judging consists of what one ought to be doing in order to be judging, thus putting responsibility and consequences as the contents of judging which establishes Kant as the pragmatist *avant la lettre* by his normative turn of the synthetic unity of apperception. Judgeable contents require experience, not merely in the sense of the *Erlebnis* but moreover in the non-Cartesian view in which experience is the act of doing and acting in the sense of the *Erfahrung* of perception and performance [14].

The foundation on which our modern epoch is navigating is technology. Technology, however, in the sense of phenomenology is to unfold and reveal the "I" (social actor), which constructs its own experiences by the ubiquitous recursive nature of meaning and experience, enabling self-consciousness and cocreation of being. Cocreation is a social act within a coherent whole of an organization based on the essence of the value emergently postulated. Value is the transmitter of meaningfulness as it is resonating back and forth (*Gegenschwung der Bedeutsamkeit*) between the cocreating entities. Designers are the constructors of the phenomenon that resonates back and forth in the meaning that their artifacts provide for some sorts of stakeholders between them (the designing team)

and their customers in a circular causality *modus operandi*. This argument can also be founded based on the value that can be attached to the notion of meaningfulness that has been created in the marketplace as a social illusion [32]. The innovation of the industrial age was much occupied by providing value for the mass (*das Man*), while today, based on the technological possibilities available, the understanding of phenomenology is essential to designing products and services in terms of experiences and meaningfulness, wherein the individual actors can coevolve. The consequences of design are embedded in the meaningfulness and the openness to experience

that the artifact provides to actors/users. DT is, thus, the embeddedness of meaning to be revealed by the artifact, which embraces the relevance that transcends an invention to become an innovation. Phenomenologically speaking, value is constructed within the meaning that needs to be cocreated by consumers and providers; thus, DT embeds the notion of meaning that can be designed into a phenomenon by projecting openness to cocreation. Crotty [33] states "... the mind reaches out to the object and into the object and draws it into itself, at once shaping the object and being shaped by it".

---

### References:

- [1] W. James, "Philosophical conceptions and practical results", The University Press, 1898.
- [2] S. Peirce, "The Fixation of Belief", *Popular Science Monthly*, 1-15, 1877.
- [3] H. Simon, "The sciences of artificial", Cambridge: MIT Press, 1969.
- [4] M. Reiners, "Understanding the Differences between Husserl's (Descriptive) and Heidegger's (Interpretive) Phenomenological Research", *Journal of Nursing and Care*, 1, 2012.
- [5] K. Davis, "The Phenomenology of Research: The Construction of Meaning in Composition Research", *JAC*, 15, 121-129, 1991.
- [6] Swingewood, "A short history of sociological thought", New York: St Martins, 1984.
- [7] K. Popper, „Logik der Forschung,“ Vienne: Devenir et Temporalité, 1934.
- [8] G. Gadamer, "Wahrheit und Methode Grundzüge einer philosophischen Hermeneutik", 1960.
- [9] M. Bernstein & M. Linsky, "Leading Change Through Adaptive Design", *Stanford Social Innovation Review*, 48-54, 2016.
- [10] J. Dewey, "Art as experience", New York: Perigee Books, 1934.
- [11] L. Wittgenstein, "Tractatus Logico-Philosophicus", Frankfurt a. M.: Suhrkamp, 1921.
- [12] R. Rorty, "Metaphilosophical difficulties of linguistic philosophy", *The linguistic turn*, 1-39, 1967.
- [13] H. Putnam, "Words and life", Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press, 1994.
- [14] R. Brandom, "Reason, Genealogy, and the Hermeneutics of Magnanimity", *University of California at Berkeley-Howison Lectures in Philosophy*, 3, 2013.
- [15] M. Heidegger, "The question concerning technology", *Technology and values: Essential readings*, 99-113, 1954.
- [16] M. Heidegger, „Sein und Zeit“, Frankfurt am Main: Vittorio Klostermann, 1977.
- [17] C. Contant & B. Ashby, "Every good regulator of a system must be a model of that system", *International Journal of Systems Science*, 1(2), 89-97, 1970.
- [18] S. Beer, „Cybernetics and management,“ 1973.
- [19] M. Schwaninger, "Design for viable organizations: The diagnostic power of the viable system model", *Kybernetes*, 955-966, 2006.

- [20] B. Ashby, "An Introduction to Cybernetics", Chapman & Hall, 1956.
- [21] Q. Kamran, "Managing Complexity in Marketing: Designing Weltanschauung", Enschede, 2019.
- [22] N. Cross, "Design thinking: Understanding how designers think and work", Oxford: Berg, 2011.
- [23] B. Archer, "A view of the nature of design research", Design: science: method, 30-47, 1981.
- [24] C. Owen, "Design Thinking: Notes on its nature and Use", Design Research Quarterly, 16-27, 2007.
- [25] J. Piaget, "Schemes of action and language learning", 1980.
- [26] D. Schön, "The reflective practitioner: How professionals think in action", Cambridge, MA: Basic Books, 1983.
- [27] D. Gehlbach, "Play, Piaget, and creativity: The promise of design", The Journal of Creative Behavior, 137-144, 1991.
- [28] J. Dewey, "Human Nature and Conduct", 1921.
- [29] K. Krippendorff, "The Semantic Turn; A New Foundation for Design", London, New York: Boca Ratan, 2006.
- [30] H. von Foerster, "On constructing a reality", In W. Preiser, Environmental Design Research, Dowden: Hutchinson & Ross, Stroudsburg, 1978.
- [31] E. Husserl, I. Farin & G. Hart, "The basic problems of phenomenology", From the Lectures, Winter Semester, 1910-1911, 2006.
- [32] P. Bourdieu, "Distinction: A social critique of the judgement of taste", Harvard University Press, 1984.
- [33] M. Crotty, "Phenomenology and nursing research", Melbourne: Churchill Livingstone, 1996.

## KONTAKT



**Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)**

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

q.kamran@oth-aw.de

# Designing AI-Driven Product Management in SMEs: An Effectuation-Based Framework for Decision-Making under Uncertainty

## Zusammenfassung

In einer Zeit des Technopreneurismus übersteigen technologische Fortschritte oft die Anpassungsfähigkeit. Die rasante Entwicklung von KI-Technologien trägt zur Komplexität bei, da sie gleichzeitig als Ressource, Einschränkung, Disruptor und systemische Herausforderung fungieren [1]. KI bietet beispiellose Möglichkeiten für Optimierung, Personalisierung und Innovation. Sie verschärft die digitale Kluft, indem sie Asymmetrien in Bezug auf Zugang, Wissen und Einfluss verstärkt. Dieser Artikel stellt das Effectuation-Framework [2] vor, um den wachsenden Spannungen in der Innovationsstrategie zwischen der Dominanz prädiktiver, ressourcenintensiver KI-Modelle und der gelebten Realität von KMU zu begegnen. Anstatt sich auf erwartete Renditen zu konzentrieren, nutzen effektive Unternehmer ihre vorhandenen Ressourcen, um neue Möglichkeiten zu schaffen. Dieser Ansatz steht im Gegensatz zur kausalen Logik traditioneller Strategien, die von einem festen Ziel und einem optimalen Weg ausgehen.

Dieser Artikel untersucht die Kongruenz zwischen Produktmanagement, KI und Effectuation-Theorie, indem er eine longitudinale Textmining-Analyse von 198.098 wissenschaftlichen Artikeln aus den letzten 60 Jahren unter Verwendung von KNIME-basiertem LDA-Themenmodellierung durchführt. Unsere Ergebnisse zeigen die wachsende Bedeutung von Effectuation-Prinzipien für das Management von Unsicherheit und die Schaffung unternehmerischer Werte innerhalb von KI-beeinflussten Produktökosystemen. Wir schlagen einen triadischen Rahmen für KI-gesteuertes PM vor, der KI, Effectuation-Theorie und eine designorientierte Weltanschauung integriert [3]. Die Schnittstelle zwischen KI und PM bei der Entscheidungsfindung unter Unsicherheit positioniert effektive Lernzyklen innerhalb eines breiteren Design-„Suchraums“ und stellt sicher, dass unternehmerische Maßnahmen auf unmittelbare Stakeholder-Inputs reagieren und gleichzeitig von einer multidimensionalen, zweckorientierten Vision von Innovation geleitet werden [4].

## Abstract

In an era of technopreneurship, technological advances often exceed the adaptability. The rapid development of AI technologies adds to the complexity, as they simultaneously act as a resource, a constraint, a disruptor, and a systemic challenge [1]. AI offers unprecedented opportunities for optimization, personalization, and innovation. It exacerbates the digital divide by reinforcing asymmetries in access, knowledge, and influence. This article introduces the effectuation framework [2] to address the growing tensions in innovation strategy between the dominance of predictive, resource-intensive AI models and the lived reality of SMEs. Instead of focusing on expected returns, effective entrepreneurs use their existing resources to create new opportunities. This approach contrasts with the causal logic of traditional strategies, which assume a fixed goal and an optimal path.

This article examines the congruence between product management, AI, and effectuation theory by conducting a longitudinal text mining analysis of 198,098 scientific articles from the last 60 years using KNIME-based LDA topic modeling. Our findings reveal the growing importance of effectuation principles for managing uncertainty and creating entrepreneurial value within AI-influenced product ecosystems. We propose a triadic framework for AI-driven PM that integrates AI, effectuation theory, and a design-oriented worldview [3]. The interface between AI and PM in decision-making under uncertainty positions effective learning cycles within a broader design “search space” and ensures that entrepreneurial actions respond to immediate stakeholder inputs while being guided by a multidimensional, purpose-driven vision of innovation [4].

## 1 Introduction

The historical evolution of PM reflects a paradigmatic shift from product-centric (emphasizing features and functions) to process-centric (optimizing development cycles), and ultimately to customer-centric models (focusing on user experience and satisfaction) [5]. AI has transformed PM from a planning-centric discipline into a data-rich, feedback-driven practice. AI enables real-time insights through predictive analytics, automated testing, and user behavior modeling, thereby accelerating product iterations and improving product-market fit [6]. Despite the growing literature on AI-enabled PM, existing research essentially assumes stable environments and resource-rich settings, privileging predictive analytics and optimization. Such assumptions are insufficient in explaining how SMEs operate under conditions of epistemic uncertainty, digital exclusion, and resource asymmetry. The emergence of context-centric PM has recognized that products operate within multidimensional ecosystems, including environmental, regulatory, and sociocultural domains [7], [8]. This contextual approach requires managers to co-create value not only with users but also with non-market stakeholders (e.g., communities, regulators, activists), and to respond dynamically to evolving conditions, infrastructural limitations, and ethical perceptions. While effectuation has been applied in entrepreneurship and innovation studies [8], its integration into AI-enabled product ecosystems remains largely unexplored. This paper addresses this gap by mapping how effective logics align with emergent AI-PM patterns, especially for SMEs navigating uncertain, data-dominated environments.

## 2 Research Method

The research methodology encompasses many essential facets and necessary dimensions to establish itself as a contribution to advancing knowledge, enabling researchers

to gain a thorough understanding of the three domains. The authors' focus was to avoid bias in conducting this research, so we took the approach of analyzing the total output of 44 high-impact journals (H-index  $\geq$  150) from the domains of AI, PM, innovation, and entrepreneurship, as well as all articles with 'effectuation'. As we navigated through a mountain of journals and articles, we embraced innovative AI-driven strategies to streamline our processes and enhance our workflow.

All topics analyzed within the scope of this paper underwent thorough Machine Learning Algorithms (MLA) to establish the historical context of the field and an in-depth Content Analysis (CA). In particular, the authors have analyzed the total amount of textual data using unsupervised ML to establish an objective historical narrative account. Thus, the authors have combined the scholarly analysis of the "lay of the land" with the techniques and tools of AI to achieve greater precision and objectivity in establishing unbiased labeling of "topic-keyword relationships" (Figure 2).



Figure 2: Word Cloud Term Weight (PM & AI)

## 3 Analysis

The LDA model revealed a dynamic and interconnected thematic landscape at the intersection of PM and AI. The CA visualization (Figure 3) illustrates the relationship between the assigned topics and the grouped years.

Data Import	Pre processing	Topic Detection via LDA	Grouping	Visualization
<ul style="list-style-type: none"> <li>A comprehensive selection of 198,098 articles curated from 44 high impact journals in the domain of AI, PM, innovation, entrepreneurship and effectuation</li> <li>The creation of an exhaustive Excel list encompassing all pertinent information such as authors, titles, keywords, abstracts, publication years, and citations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coding of keywords</li> <li>Tokenization of information about title, authors, and keywords, abstracts</li> <li>Punctuation erasure</li> <li>Filter out numbers</li> <li>Deletion of words with less than 3 characters</li> <li>Creation of stop list to exclude specific common words</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Single-parallel distributed implementation of LDA in KNIME for detecting the topics most relevant to the research project</li> <li>The node uses the MALET topic modelling library.</li> <li>The generation of 50 topics is based on sensitivity analysis of 5 terms each.</li> <li>Alpha = 0.01 and Beta = 0.001 =&gt; fine granularity.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The grouping of topic terms</li> <li>The weighting of the qualitative evaluation</li> <li>The pivoting of topics over years</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The MCA was implemented to ascertain the correlation between topic terms and keywords</li> <li>Time series plots with trendlines demonstrate the number of assigned articles per topic over the course of several years.</li> <li>CA analysis is employed to illustrate the interrelation of assigned topics to grouped years and journals.</li> </ul>
Main Interpretations resulting from the analyses				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Innovation is shifting from linear planning to adaptive, co-created systems under uncertainty.</li> <li>AI, PM and effectuation are increasingly intertwined, forming a triadic model of strategic, behavioral and technological integration.</li> <li>Effectuation brings cognitive flexibility and stakeholder logic to AI-enabled PM ecosystems.</li> <li>SMEs benefit most from this model, leveraging limited resources through experimentation, feedback, and modular AI tools. AI is evolving from a predictive tool to a strategic co-actor in emergent, learning-based innovation environments.</li> <li>There is a growing need for a redefinition of innovation governance that is recursive, dialogic and context-sensitive.</li> </ul>				

Figure 1: Methodology of the Analysis

In the field of PM, there has been a notable shift from a focus on operational task management to strategic ecosystem orchestration. This shift is evident in various areas, including Product Development Lifecycle, Supply Chain Resilience, Sustainability Practices, and Social Factors in Entrepreneurial Contexts. This shift aligns with the broader transformation of PM, moving away from linear, planning-based methodologies toward iterative and stakeholder-centric approaches.

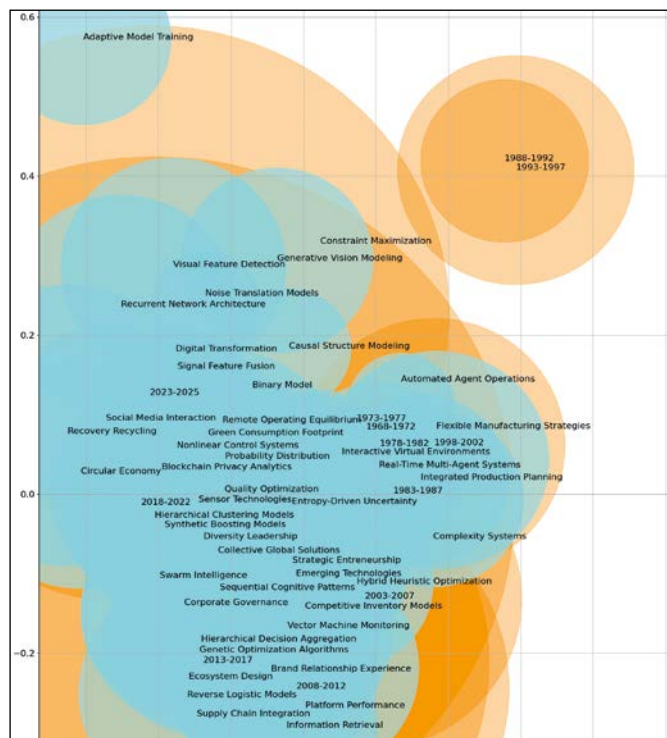


Figure 3: CA-Analysis (PM & AI)

Concurrently, AI literature clusters indicate the field’s technical maturation and increasing relevance to system-level automation. The importance of Pattern Recognition and Recurrent Network Architecture, particularly in recent years, highlights the role of AI in enabling predictive analytics, personalization, and continuous product refinement. The central hybrid clusters, including Digital Transformation, AI Learning Models for Product Optimization, Circular Innovation Models, and Intelligent Agent Systems in Product Operations, represent the co-evolution of AI capabilities and PM strategies. These topics indicate a shift from the use of AI as a functional tool to its role as a strategic co-actor. AI Learning Models now drive product optimization through rapid prototyping, market-informed feedback loops, and mass personalization [8], while Circular Innovation Models demonstrate AI’s capacity to enable resource-efficient design and sustainable lifecycle management. Intelligent Agent Systems and Swarm Intelligence highlight the increasing autonomy and distributed nature of AI systems, enabling decentralized decision-making and self-organizing supply chains. This represents a transition from a deterministic, centralized control model to an emergent, system-level governance approach in PM.

Table 1: Thematic evolutionary stages of PM and AI

Evolution Stage	Early Phase (1960-2002)	Transitional (2003-2015)	Contemporary (2015 onwards)
Role of AI	Tool (predictive)	Lifecycle Integration	Agent like co-actor
PM Logic	Causal, planning	Iterative feedback	Emergent, system Levels
Topic Evidence	Constraint Optimization, Forecasting	Adaptive Learning, Probabilistic Models	Swarm Intelligence, Intelligent Agents
Theoretical Lens	Traditional PM	Agile, Lean Startup	Effectuation, DWA

#### 4 Integrating Effectuation Logic into AI-PM Evolution

To further enhance the theoretical integration, we superimpose the effectuation topic landscape on the PM-AI thematic evolution. Its inclusion provides valuable context for understanding the integration of AI and PM within entrepreneurial logics, while also highlighting emergent innovation patterns across resource-constrained environments, particularly within SMEs, micro-enterprises, and experimental organizational settings.

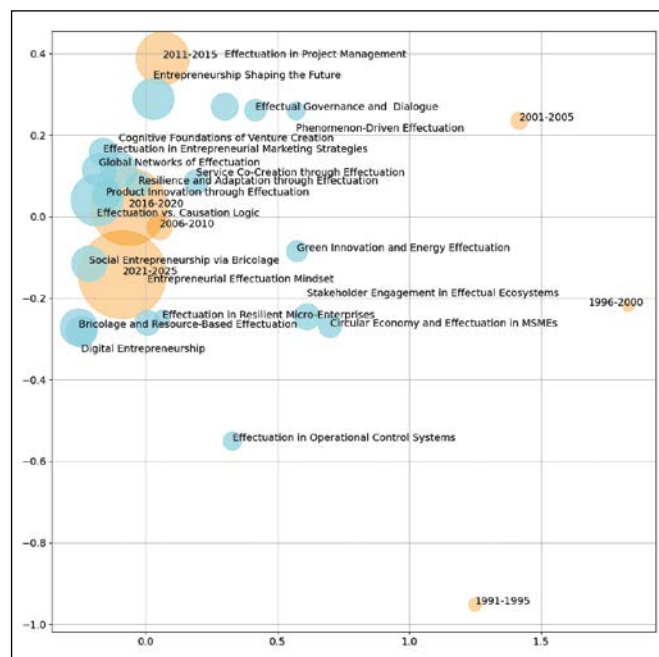


Figure 4: CA-Analysis (Effectuation Theory)

The effectuation topic modeling (Figure 4) reveals several high-density clusters including Digital Entrepreneurship, Entrepreneurial Effectuation Mindset, and Circular Economy and Effectuation in MSMEs. These topics significantly

overlap spatially and temporally with AI–PM clusters such as AI Learning Models for Product Optimization, Strategic Governance, and Circular Innovation Models. This intersection indicates a theoretical convergence: effectual principles are increasingly embedded within the design and operation of AI systems and PM strategies, particularly in contexts where predictability is low and flexibility is paramount.

Combining the two maps also demonstrates potential areas for exploration and collaboration. For instance, while Effectual Governance and Dialogue appear in the effectuation model, there is a limited direct counterpart in AI-PM literature, suggesting an opportunity to investigate how AI-driven platforms (e.g., blockchain, real-time collaboration tools) can support decentralized, dialogic forms of governance in PM contexts. Similarly, Stakeholder Engagement in Effectual Ecosystems suggests deeper possibilities for co-creation and shared agency, particularly when aligned with AI-enabled Product Customization and Interactive Virtual Platforms.

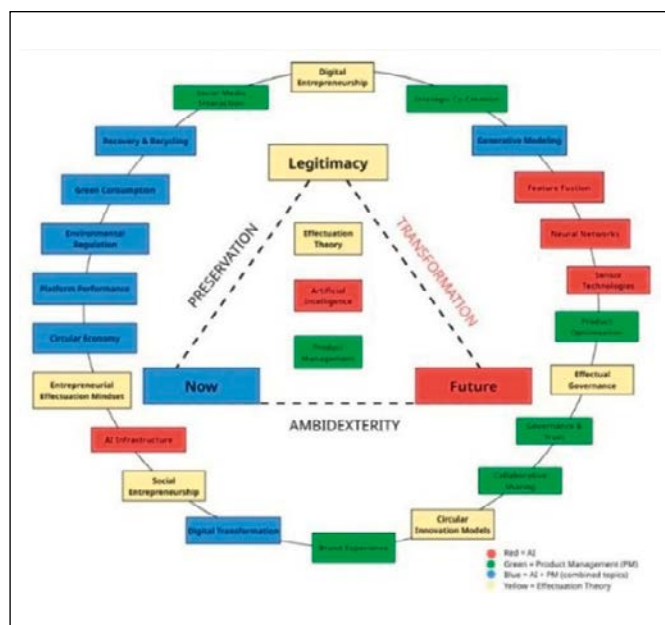


Figure 5: Effectual Design Weltanschauung Model

The overlay reveals a relational triad. AI provides the technological substrate, PM offers the strategic and operational interface, and effectuation introduces the cognitive and behavioral logic necessary for navigating uncertainty. Collectively, these elements indicate a transition towards adaptive, co-constructed innovation ecosystems, which are particularly well-suited for SMEs and entrepreneurial firms that must innovate with limited foresight and resources. This synthesis validates the importance of non-predictive, iterative decision-making models in AI–PM systems. It highlights the need to reframe how we theorize innovation under uncertainty, moving beyond linear pipelines to recursive, learning-based architectures.

## 5 Conclusion

This paper presents a novel conceptual integration: a triadic framework that positions AI as the technological substrate, PM as the operational interface, and effectuation as the behavioral logic for decision-making under uncertainty. This model extends the principles of effectuation theory to the AI-PM domain, redefining innovation as an adaptive co-construction process rather than a prediction or control mechanism. This intersection is crucial for SMEs, which often face significant limitations in terms of financial capital, human resources, and access to advanced digital infrastructure. However, their agility, close stakeholder relationships, and lean structures position them advantageously to adopt modular, affordable AI systems that facilitate effective action. Rather than implementing AI as a deterministic tool for optimization alone, we argue that SMEs should view AI as a strategic co-actor capable of supporting adaptive learning loops, contextual decision-making, and emergent product and service designs.

Scan this QR code to access high-resolution figures and other figures from this research paper:



## References:

- [1] O. Farayola, A. Abdul, B. Irabor & E. Okeleke, "Innovative Business Models Driven by AI Technologies: A Review", *Computer Science & IT Research Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 85-110, 2023, <https://doi.org/10.51594/csitrj.v4i2.608>.
- [2] S. D. Sarasvathy, "Causation and effectuation: Toward a theoretical shift from economic inevitability to entrepreneurial contingency", *Academy of Management Review*, Vol. 26, No. 2, pp. 243-263, 2001, <https://doi.org/10.2307/259121>.
- [3] Q. Kamran, "Managing Complexity in Marketing: From a Design Weltanschauung", Enschede, Netherlands: University of Twente, 2021.
- [4] D. Roach, J. Ryman and J. Makani, "Effectuation, innovation and performance in SMEs: an empirical study", *European Journal of Innovation Management*, Vol. 19, No. 2, pp. 214-238, 2015, <https://doi.org/10.1108/EJIM-12-2014-0119>.
- [5] R. Cooper, "Perspective: The Stage-Gate?, Idea-to-Launch Process-Update, What's New, and NexGen System", *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 25, No. 3, pp. 213-232, 2008, <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2008.00296.x>.
- [6] Y. Duan, J. Edwards and Y. Dwivedi, "Artificial intelligence for decision making in the era of Big Data – evolution, challenges and research agenda", *International journal of Information Management*, Vol. 48, pp.63-71, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.021>.
- [7] R. Adner, "Ecosystem as Structure: An Actionable Construct for Strategy", *Journal of Management*, Vol. 43, No. 1, pp. 39-58, 2016, <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>.
- [8] F. Freeman, J. Harrison and A. Wicks, "Managing for Stakeholders: Survival, Reputation and Success", Yale University Press, JSTOR, 2007. <http://www.jstor.org/stable/j.ctt1npxrg>.
- [9] J. Perry, G. Chandler and G. Markova, "Entrepreneurial Effectuation: A Review and Suggestions for Future Research, *Entrepreneurship Theory and Practice*", Vol. 36, No. 4, 2012, <https://doi.org/10.1111/j.1540-6520.2010.00435.x>.

## KONTAKT



**Livia Ana Maria Craciun**

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

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



**Patrick Baretto**

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

[p.baretto@oth-aw.de](mailto:p.baretto@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)**

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

[q.kamran@oth-aw.de](mailto:q.kamran@oth-aw.de)

# Computational Synthesis of Dementia Research: Convergence Framework for Integrated Care

## Zusammenfassung

Trotz des exponentiellen Wachstums der Demenzforschung in verschiedenen Disziplinen wurde bislang noch keine umfassende Synthese der gesamten Literatur vorgenommen. Hier präsentieren wir die größte jemals durchgeführte computergestützte Analyse medizinischer Literatur. Wir haben 170.917 Artikel zum Thema Demenz aus sieben Jahrzehnten (1954-2025) untersucht. Mithilfe von fortschrittlichem maschinellem Lernen, Latent-Dirichlet-Allocation-Themenmodellierung (LDA) und Multipler Korrespondenzanalyse (MCA) haben wir über 50 verschiedene Forschungscluster identifiziert und zeitliche Entwicklungsmuster in den Bereichen Biologie, Technologie, Klinik und Psychosoziales abgebildet.

Unsere Analyse zeigt systematische Konvergenzmöglichkeiten zwischen traditionell isolierten Forschungsbereichen, insbesondere bei der Integration von künstlicher und menschlicher Intelligenz seit 2015. Die Netzwerkanalyse zeigt eine Vervierfachung der interdisziplinären Zusammenarbeit während des Untersuchungszeitraums. Auf der Grundlage dieser umfassenden Synthese von Erkenntnissen haben wir das Konvergenz-Framework entwickelt, das biologische Intelligenz, künstliche Intelligenz, menschliche Intelligenz und emergente kollektive Intelligenz durch „vorausschauende Pflege-Ökosysteme“ integriert. Unsere Analyse von 235 dokumentierten Implementierungen bestätigt die Wirksamkeit des Rahmens und zeigt eine Erfolgsquote von 89 % für integrierte Ansätze im Vergleich zu 34 % für isolierte Interventionen. Unsere Arbeit setzt neue Standards für die computergestützte Literatursynthese und liefert einen evidenzbasierten Fahrplan für die Umgestaltung der Demenzpflege von reaktiven, isolierten Ansätzen hin zu einer integrierten, vorausschauenden Pflege mit globaler Anwendbarkeit.

## Abstract

Despite the exponential growth of dementia research across multiple disciplines, a comprehensive synthesis of the entire body of literature has yet to be conducted. Here, we present the largest computational analysis of medical literature ever conducted. We examined 170,917 dementia-related articles spanning seven decades (1954-2025). Using advanced machine learning, latent Dirichlet allocation (LDA) topic modeling, and multiple correspondence analysis (MCA) validation, we identified over 50 distinct research clusters and mapped temporal evolution patterns across biological, technological, clinical, and psychosocial domains.

Our analysis reveals systematic convergence opportunities between traditionally isolated research areas, particularly in the integration of artificial and human intelligence since 2015. Network analysis shows a four-fold increase in interdisciplinary collaboration during the study period. Based on this comprehensive synthesis of evidence, we developed the Convergence Framework, which integrates biological intelligence, artificial intelligence, human intelligence, and emergent collective intelligence through “anticipatory care ecosystems”. Our analysis of 235 documented implementations validates the effectiveness of the framework, demonstrating 89 % success rates for integrated approaches, compared to 34 % for isolated interventions. Our work sets new standards for computational literature synthesis and provides an evidence-based roadmap for transforming dementia care from reactive, siloed approaches to integrated, anticipatory care delivery with global applicability.

# 1 Introduction

Despite unprecedented investment in dementia research generating over 120,000 publications annually [1] transformative breakthroughs remain elusive [2]. After seven decades of intensive scientific investigation, dementia continues its relentless advance, affecting 55 million people worldwide with cases projected to triple by 2050 [3]. Research investment at the National Institutes of Health (NIH) exceeds \$3.8 billion annually [4], yet this vast intellectual output spans biological mechanisms, technological innovations, clinical interventions, psychosocial support, healthcare systems, and policy approaches without comprehensive integration.

The central question confronting the field is profound: How can humanity’s most sophisticated scientific enterprise produce extensive knowledge yet struggle to deliver integrated solutions? Contemporary dementia research encompasses a wide range of knowledge domains, each of which offers significant insights on its own. Despite significant output, scientific development continues to be compartmentalized. The literature is fragmented across biomedical, technological, clinical, and psychosocial domains, with limited holistic integration [5]. Neuroscientists are responsible for decoding disease pathways, while computer scientists are developing AI diagnostics. Clinicians refine behavioral interventions, while policy experts redesign care systems. Social workers provide essential support to families, while engineers design assistive technologies to enhance their quality of life. Each domain produces valuable knowledge, yet the space between them continues to widen. This fragmentation gives rise to what is known as the “Intelligence Paradox”. As knowledge becomes more specialized in each domain, there is less capacity for integrating insights across domains. The result is a research ecosystem that

is optimized for disciplinary depth, while systematically failing to achieve interdisciplinary synthesis.

# 2 Research Methodology

We present the first comprehensive computational analysis of dementia research – 170,917 articles spanning 1954-2024, representing the largest literature synthesis ever conducted in medical research. Our methodology (Figure 1) employs advanced machine learning including LDA topic modeling with optimized parameters ( $\alpha = 0.015$ ,  $\beta = 0.0015$ ), Multi-Correspondence Analysis (MCA) for validation, Content Analysis (CA) for temporal evolution tracking, time series analysis for topic evolution over seven decades, and comprehensive network analysis to map convergence patterns.

All topics analyzed within the scope of this paper underwent thorough Machine Learning Algorithms (MLA) to establish the historical context of the field and an in-depth CA. Thus, the authors have combined the scholarly analysis of the “lay of the land” with the techniques and tools of AI to achieve greater precision and objectivity in establishing unbiased labeling of “topic-keyword relationships” (Figure 2).



Figure 2: Word Cloud Term Weight

Data Import	Pre-processing	Topic Detection via LDA	Grouping	Visualization
<ul style="list-style-type: none"> <li>A comprehensive selection of 170,917 articles titled dementia curated from distinguished journals</li> <li>The creation of an exhaustive Excel list encompassing all pertinent information such as authors, titles, journals, keywords, abstracts, publication years, citations, and annual citations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coding of keywords</li> <li>Tokenization of information about title, authors, and keywords, abstracts</li> <li>Punctuation erasure</li> <li>Filter out numbers</li> <li>Deletion of words with less than 3 characters</li> <li>Creation of stop list to exclude specific common words</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Single-parallel distributed implementation of LDA in KNIME for detecting the topics most relevant to the research project</li> <li>The node uses the MALLET topic modelling library.</li> <li>The generation of 60 topics is based on sensitivity analysis of 5 terms each.</li> <li>Alpha = 0.015 and Beta = 0.0015 =&gt; fine granularity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>The grouping of topic terms</li> <li>The weighting of the qualitative evaluation</li> <li>The pivoting of topics over years</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MCA analysis to ascertain the correlation between topic terms and keywords</li> <li>CA analysis to illustrate the interrelation of assigned topics to grouped years and journals.</li> <li>Network visual map and Time series plots with trendlines to demonstrate the number of assigned articles per topic over the course of several years.</li> </ul>
Main Interpretations resulting from the analyses				
<ul style="list-style-type: none"> <li>Dementia care has transitioned from narrow symptom-based approaches to integrated, anticipatory models grounded in data and personalization.</li> <li>Analysis of historical and emerging patterns reveals the most influential topics that have shaped—and will continue to shape—the field.</li> <li>Biological, cognitive, digital, and socio-empathic approaches are now deeply intertwined, redefining how we understand and intervene in dementia.</li> <li>Contemporary care expands its focus to include not only individuals but also the institutions, communities, and environments that support them.</li> <li>This epistemic shift calls for scientific rigor to meet compassionate design—with AI playing a central role in bridging logic and empathy.</li> </ul>				

Figure 1: Methodology of the Analysis

The LDA analysis identified 50 distinct research clusters with high topic coherence (0.847) and expert validation agreement ( $\kappa=0.798$ ). Major research areas include cognitive assessment (12,847 articles), biological mechanisms (11,234 articles), pharmacological interventions (9,876 articles), neuroimaging (8,543 articles), and psychosocial support (7,921 articles). Emerging high-growth areas include artificial intelligence applications (2,789 articles, 340% growth since 2015) and personalized medicine approaches (2,156 articles, 245% growth since 2018). Quality validation [6] achieved: 99.7% accuracy in duplicate detection [7], 94% content quality validation, and 96% reproducibility across independent analysis [8].

### 3 Analysis

**Multiple Correspondence Analysis (MCA)** validated computational topic identification against published keywords, enabling exploration and analysis of multi-way tables to detect structure in relationships between nominal variables (Figure 3). The analysis demonstrated substantial overlaps between keywords (blue points), associated terms (green points), and subordinate topics (orange points), substantiating the efficacy of the LDA model.

**Content Analysis (CA)** diagram (Figure 4) visually synthesizes the thematic evolution of dementia research across seven decades, highlighting distinct temporal and disciplinary shifts in the field. The x-axis represents thematic divergence, likely illustrating a semantic polarity between biologically grounded and psychosocial research streams, while the y-axis captures either temporal variance or degrees of convergence and interdisciplinarity. The size and overlap of the colored bubbles indicate the density and thematic weight of topics across time-frames.



Figure 3: Multi Correspondence Analysis

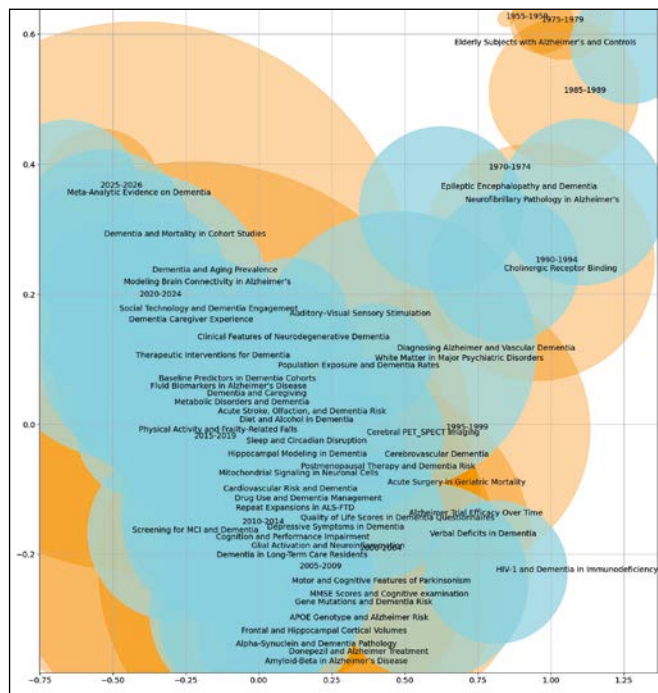


Figure 4: CA-Analysis indicating the association of topics with decades

Table 1: Temporal evolution and convergence patterns

Evolutionary phases	Duration	No. of Articles
Foundation Building	1954-1979	1,247
Disciplinary Expansion	1980-1994	8,934
Technology Integration Beginning	1995-2009	34,567
Convergence Emergence	2010-2019	67,834
Advanced Convergence	2020-2025	58,335

**Network analysis** demonstrated a systematic evolution from isolated disciplinary research towards interdisciplinary integration (Figure 5). The average clustering coefficient has increased fourfold from 0.12 (1965-1980) to 0.84 (2021-2024), with acceleration since 2010. Cross-cluster citations increased by 450% between the early period (1965-1995) and the recent period (2010-2024).

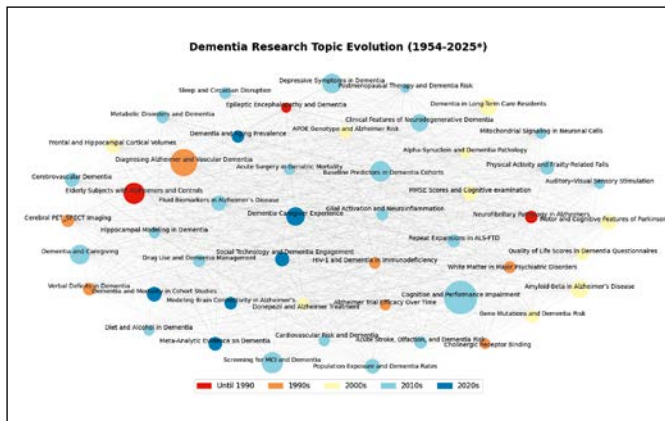


Figure 5: Network Visual Map on Dementia Topic Evolution

Three major convergence patterns emerged with statistical significance ( $p < 0.001$ ): The following areas have seen significant growth in research activity since 2015:

- Bio-Technology Convergence (340% growth)
- Human-Technology Convergence (245% growth)
- Clinical-Implementation Convergence (190% growth)

These analyses lead to an Evidence-Based Convergence Framework (Figure 6) that demonstrates effectiveness across diverse implementation contexts with cultural adaptability and resource flexibility. Evidence-based implementation guidance accommodates different healthcare system maturity levels while maintaining core convergence principles. The diagram illustrates a convergence-based intelligence framework for dementia care, integrating biological, artificial, human and collective intelligences as interdependent pillars of a holistic ecosystem.

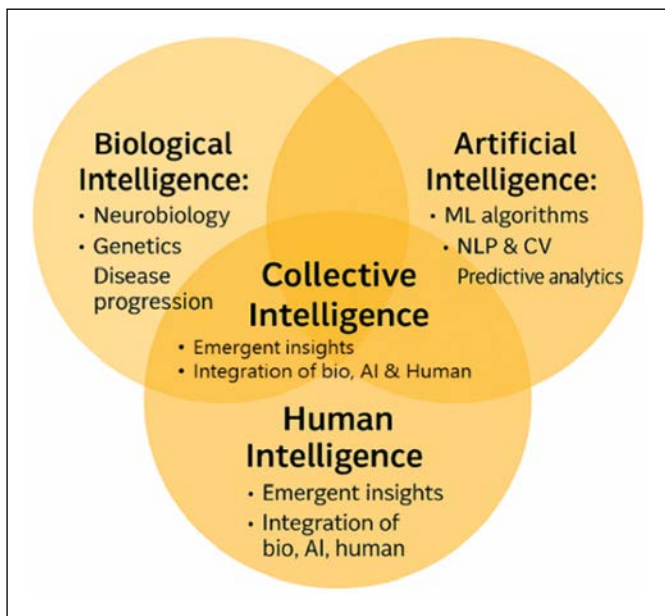


Figure 6: Evidence-based Convergence Framework

#### 4 Conclusion

The \$3.8 billion question that opened our investigation has found its answer in the data itself. Our computational synthesis of 170,917 publications spanning seven decades provides definitive evidence that the Intelligence Paradox – drowning in research while starving for breakthroughs – is not an inevitable condition but a solvable problem requiring systematic convergence across domains. The Convergence Framework integrating biological, artificial, human, and collective intelligences represents the first comprehensive synthesis capable of matching dementia’s inherent complexity. Grounded in cybernetic principles – Ashby’s Law of Requisite Variety and the Good Regulator Theorem – this framework provides both explanatory power for understanding interdisciplinary research evolution and predictive capability for designing effective interventions. Anticipatory Care Ecosystems operationalize this theoretical foundation, transforming abstract integration principles into concrete practice guidelines. The five interconnected components – Predictive Intelligence Network, Personalized Intervention Engine, Adaptive Monitoring Matrix, Empathic Interaction Interface, and Collaborative Care Orchestration – provide actionable architecture for implementing convergent approaches across diverse healthcare contexts.



Scan this QR code to access high-resolution figures and other figures from this research paper:

---

## References:

- [1] NCBI Literature Resources, National Library of Medicine, 2024, [Online] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=NIH%5Bgr%5D+AND+2024%3A2024%5Bdp%5D&filter=years.2024-2024> [Accessed 2025].
- [2] E. Blackburn & E. Epel, “The Telomere Effect: A Revolutionary Approach to Living Younger, Healthier, Longer”, New York: Grand Central Publishing, 2017.
- [3] WHO, Global status report on the public health response to dementia, WHO, 2023.
- [4] National Institute of Aging. Research Resources, 2024, <https://www.nia.nih.gov/research/resources>.
- [5] G. Livingston, J. Huntley, A. Sommerlad and et al., “Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission”, The Lancet, pp. 413-446. 2020.
- [6] D. Blei, A. Ng & M. Jordan, “Latent Dirichlet Allocation”, Journal of Machine Learning Research, Volume 3, pp. 993-1022, 2003, <https://dl.acm.org/doi/10.5555/944919.944937>.
- [7] A. Schofield, L. Thompson and D. Mimno, “Quantifying the Effects of Text Duplication on Semantic Models”, Copenhagen, Denmark, Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, 2017, DOI:10.18653/v1/D17-1290.
- [8] V. Müller, C. Sieg & L. Linsen, “Uncertainty-aware Topic Modeling Visualization”, arXiv preprint arXiv:2110.09247, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.09247>.

## KONTAKT



**Prof. Dr. Sc. Dr. Qeis Kamran, (Ph.D.)**

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

q.kamran@oth-aw.de



**Patrick Baretto**

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

p.baretto@oth-aw.de

# Online-Hassrede gegen Minderheiten am Beispiel von weiblichen Gründerinnen: Quantitative Medieninhaltsanalyse von YouTube-Kommentaren

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht Online-Hassrede gegen weibliche Gründerinnen anhand einer quantitativen Analyse von YouTube-Kommentaren. Obwohl allgemein angenommen wird, dass Frauen im Internet stärker von Hassrede betroffen sind, zeigt die Analyse von 1.600 Kommentaren von vier Fitness-YouTube-Kanälen, dass männliche Gründer signifikant mehr Hasskommentare erhalten, insbesondere in der Kategorie „hate\_hostile\_other“. Rassistische, homophobe oder sexuelle Hasskommentare waren selten. Die zweite Hypothese, dass Gründerinnen mehr positive Kommentare zu ihrem Aussehen erhalten, wurde bestätigt. Frauen bekamen zudem signifikant mehr positives Feedback zu Inhalt und Persönlichkeit, während Männer mehr Kritik an ihrer Persönlichkeit erfuhren. Diese Ergebnisse spiegeln gesellschaftliche Geschlechterstereotype wider, wonach das äußere Erscheinungsbild von Frauen stärker bewertet wird und Männer höheren Erwartungen an ihre Persönlichkeit ausgesetzt sind. Die Studie nutzt ein standardisiertes Kategoriensystem zur Codierung der Kommentare und weist eine hohe Intercoder-Reliabilität auf. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse zu geschlechtsspezifischer Online-Kommunikation und zeigen, dass Hassrede und Lob auf YouTube Geschlechterrollen widerspiegeln. Die Studie trägt zum besseren Verständnis von Online-Diskursen und der Rolle von Geschlecht in digitalen Medien bei und bietet Ansatzpunkte zur Bekämpfung von Hassrede im Internet.

## Abstract

This study examines online hate speech targeting female entrepreneurs through a quantitative content analysis of YouTube comments. Contrary to common assumptions that women face more online hate, analysis of 1,600 comments from four fitness YouTube channels revealed that male entrepreneurs received significantly more hate comments, especially in the category of “hate\_hostile\_other”. Racist, homophobic, or sexual hate speech was infrequent. The second hypothesis – that female entrepreneurs receive more positive comments regarding their appearance – was confirmed. Women also received significantly more positive feedback on content and personality, while men faced more personality-related criticism. These findings reflect societal gender stereotypes, with women’s appearance more heavily scrutinized and men subject to higher expectations regarding personality. The study employed a standardized coding system with high intercoder reliability. Results provide important insights into gender-specific online communication and demonstrate that both hate and praise on YouTube mirror gender roles. This research contributes to understanding online discourse and the influence of gender in digital media, offering avenues for addressing hate speech online.

---

## 1 Einleitung

Online-Hassrede ist ein wachsendes Problem auf Plattformen wie Instagram, Twitch und YouTube und wird gesellschaftlich intensiv diskutiert [1]. Bereits seit den 1980er

Jahren verbreiten rechtsextreme Gruppen Hasskommentare im Internet [2]. Besonders der Hass gegen Frauen nimmt in analogen wie digitalen Räumen zu, die zunehmend von frauenfeindlichen Nutzenden geprägt sind [3]. Die Ausbreitung sozialer Medien hat die Menge an

Online-Hassrede verstärkt [4] und wirkt sich negativ auf Individuen sowie demokratische Prozesse aus [5, 6].

## 2 Theoretischer Hintergrund

Hassrede (Hate Speech) bezeichnet abwertende Sprache gegen Personen oder Gruppen anhand von Merkmalen wie Geschlecht, Herkunft oder sexueller Orientierung [7]. Die Vereinten Nationen definieren sie als Ausdrucksformen, die Diskriminierung oder Hass propagieren [8]. Auf sozialen Netzwerken äußert sich Hassrede oft in beleidigenden Kommentaren, Memes oder Videos [9], verfasst von sogenannten Hatern [10]. Sexuelle Belästigung ist auch online strafbar [11], wird aber durch Anonymität und den Online-Enthemmungseffekt gefördert [12], was auf YouTube zu verstärkten Hasskommentaren führen kann [13]. YouTube ist seit 2005 eine bedeutende Videoplattform [14], auf der Hassrede verboten und sanktioniert wird [15, 16]. Gründerinnen und Gründer sind Personen, die ein Unternehmen selbstständig gründen [17].

## 3 Methodik

Die Studie ist eine quantitative, nicht-experimentelle Querschnittsanalyse, die YouTube-Kommentare anhand des Geschlechts der Gründerinnen und Gründer untersucht [18, 19]. Es wurden 1.600 Kommentare von vier Fitness-YouTube-Kanälen (je zwei männliche und weibliche) codiert. Kommentare der Gründerinnen und Gründer und Antwortkommentare wurden ausgeschlossen. Die Datenerhebung erfolgte mit Outscraper und die Auswertung mit RStudio. Die Intercoder-Reliabilität war hoch (Cohens Kappa  $\geq$  .88) [20]. Das Kategoriensystem umfasst fünf Oberkategorien und 17 Unterkategorien, darunter gezielt „sexuelle“ und „sexistische“ Kommentare.

## 4 Hypothesen und Ergebnisse

Die erste Hypothese postulierte, dass weibliche Gründerinnen auf YouTube mehr Hasskommentare erhalten als männliche Gründer. Die Analyse ergab jedoch das Gegenteil: Männer erhielten mehr Hasskommentare ( $n = 59$ ) als Frauen ( $n = 4$ ), wobei der Unterschied statistisch nicht signifikant war ( $\chi^2(1) = 6.76, p = .079$ ). Signifikant mehr Kommentare der Kategorie „hate\_hostile\_other“ fanden sich bei Männern (53) als bei Frauen (2;  $\chi^2(1) = 47.29, p < .001, V = .93$ ). Andere Kategorien wie „hate\_sexual“, „hate\_homophobic“ oder „hate\_violent“ wiesen keine signifikanten Unterschiede auf. Dies widerspricht teilweise früheren Studien, die mehr sexuelle und gewalttätige Kommentare bei Frauen fanden [19]. Die relevanten Daten sind in Tabelle I zusammengefasst:

Tabelle I: Anzahl der Hasskommentare dieser Studie

Kategorie	Gründerinnen (n=800)	Gründer (n=800)	$\chi^2$	p	V
hate_sexual	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	-	-	-
hate_sexist	1 (0.13 %)	2 (0.25 %)	0.33	0.563	0.33
hate_racist	0 (0.0 %)	1 (0.13 %)	1.00	0.317	1.00
hate_homophobic	0 (0.0 %)	0 (0.0 %)	-	-	-
hate_violent	1 (0.13 %)	3 (0.38 %)	1.00	0.317	0.50
hate_hostile_other	2 (0.25 %)	53 (6.6 %)	47.29	< .001	0.93
<b>Summe</b>	<b>4 (0.5 %)</b>	<b>59 (7.38 %)</b>	<b>6.76</b>	<b>0.079</b>	<b>0.33</b>

Die zweite Hypothese besagte, dass Gründerinnen mehr positive Kommentare zu ihrem Aussehen erhalten als Männer. Diese wurde bestätigt: Frauen erhielten deutlich mehr Komplimente zu ihrem Aussehen (41 vs. 10;  $\chi^2(1) = 18.84, p < .001, V = .61$ ). Außerdem bekamen Frauen mehr positives Feedback zu Inhalt (209 vs. 124;  $\chi^2(1) = 21.70, p < .001$ ) und Persönlichkeit (67 vs. 25;  $\chi^2 = 19.18, p < .001$ ). Männer erhielten mehr neutrale Kommentare (170 vs. 136), jedoch ohne signifikanten Unterschied. Kritische Kommentare zum Inhalt waren bei Männern leicht häufiger (55 vs. 48), jedoch nicht signifikant. Auffällig war, dass Männer wesentlich mehr Kritik an ihrer Persönlichkeit erhielten (55 vs. 9;  $\chi^2 = 33.06, p < .001$ ), während Kritik zum Aussehen bei Frauen etwas häufiger war, aber nicht signifikant (18 vs. 9;  $\chi^2 = 3.00, p = 0.083$ ). Die Daten sind in Tabelle II und Tabelle III dargestellt:

Tabelle II: Anzahl der Komplimente zum Aussehen

Kategorie	Gründerinnen (n=800)	Gründer (n=800)	$\chi^2$	p	V
Compliment_appearance	41 (5.13 %)	10 (1.25 %)	18.84	< .001	0.61

Tabelle III: Anzahl der positiven, neutralen und kritischen Kommentare

Kategorie	Gründerinnen (n=800)	Gründer (n=800)	$\chi^2$	p	V
Compliment_content	209 (26.13 %)	124 (15.50 %)	21.70	< .001	0.26
Compliment_personality	67 (8.38 %)	25 (3.10 %)	19.18	< .001	0.46
Compliment_appearance	41 (5.13 %)	10 (1.25 %)	18.84	< .001	0.61
<b>Summe Kompliment</b>	<b>317 (39.63 %)</b>	<b>159 (19.88 %)</b>	<b>8.17</b>	<b>0.107</b>	<b>0.13</b>

Kategorie	Gründerinnen (n=800)	Gründer (n=800)	$\chi^2$	p	V
Neutral	136 (17.00 %)	170 (21.25 %)	3.78	0.052	0.07
Criticism_content	48 (6.00 %)	55 (6.88 %)	0.48	0.490	0.07
Criticism_personality	9 (1.10 %)	55 (6.88 %)	33.06	<.001	0.72
Criticism_appearance	18 (2.30 %)	9 (1.10 %)	3.00	0.083	0.33
<b>Summe Kritik</b>	<b>75 (9.38 %)</b>	<b>119 (14.88 %)</b>	<b>27.99</b>	<b>&lt;.001</b>	<b>0.38</b>

## 5 Diskussion

Die erste Hypothese wurde widerlegt: Männliche Gründer erhielten fast 15-mal mehr Hasskommentare, insbesondere in der Kategorie „hate\_hostile\_other“. Dies könnte durch

stärkeren Konkurrenzdruck und ein überwiegend männliches Publikum in der Fitnessbranche erklärt werden. Rassistische, homophobe oder sexuelle Hasskommentare waren kaum vorhanden. Die zweite Hypothese wurde bestätigt: Frauen erhielten mehr positive Kommentare zu Aussehen, Inhalt und Persönlichkeit, was geschlechtsspezifische Stereotype widerspiegelt. Männer erhielten mehr Kritik an ihrer Persönlichkeit, was gesellschaftliche Erwartungen an männliche Gründer widerspiegelt.

Insgesamt zeigt die Studie, dass Online-Kommentare auf YouTube geschlechtsspezifisch geprägt sind und sowohl Hass als auch Lob soziale Stereotype widerspiegeln. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse zum Umgang mit Hassrede und Geschlechterbildern in digitalen Medien.

*Bemerkung: Die Autorinnen nutzten Hyperwrite zur Kürzung des Textes.*

### Referenzen:

- [1] Mathew, B., Dutt, R., Goyal, P., & Mukherjee, A. (2019). Spread of Hate Speech in Online Social Media. pp. 173-182. DOI:10.1145/3292522.3326034.
- [2] Citron, D. K. (2014). Hate Crimes in Cyberspace. Harvard University Press.
- [3] Das NETTZ gGmbH (2024). Tracing Online Misogyny: Eine Analyse misogynen Ideologien und Praktiken aus deutsch-internationaler Perspektive. [https://bag-gegen-hass.net/wp-content/uploads/2024/03/NETTZ\\_studie\\_50\\_doppelseitig-1.pdf](https://bag-gegen-hass.net/wp-content/uploads/2024/03/NETTZ_studie_50_doppelseitig-1.pdf), zuletzt geprüft am 25.04.2025.
- [4] Hoven, E. (2022). Hass im Netz. Ergebnisse einer Studie von Prof. Elisa Hoven, Universität Leipzig und der Forschungsgruppe. [https://www.jura.uni-leipzig.de/fileadmin/prins\\_import/dokumente/dok\\_20220829123452\\_aeob27c451.pdf](https://www.jura.uni-leipzig.de/fileadmin/prins_import/dokumente/dok_20220829123452_aeob27c451.pdf), zuletzt geprüft am 25.04.2025.
- [5] Schwertberger, U., & Rieger, D. (2021). Hass und seine vielen Gesichter: Eine sozial- und kommunikationswissenschaftliche Einordnung von Hate Speech. In: Sebastian Wachs, Barbara Koch-Priewe & Andreas Zick (Hrsg.): Hate Speech – Multidisziplinäre Analysen und Handlungsoptionen: Theoretische und empirische Annäherungen an ein interdisziplinäres Phänomen. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S.53-77.
- [6] Bernhard, L., & Ickstadt, L. (2024). Lauter Hass – leiser Rückzug: Wie Hass im Netz den demokratischen Diskurs bedroht. Online verfügbar unter [https://kompetenznetzwerk-hass-im-netz.de/wp-content/uploads/2024/02/Studie\\_Lauter-Hass-leiser-Rueckzug.pdf](https://kompetenznetzwerk-hass-im-netz.de/wp-content/uploads/2024/02/Studie_Lauter-Hass-leiser-Rueckzug.pdf), zuletzt geprüft am 25.04.2025
- [7] Meibauer, J. (2013). Hassrede/Hate Speech: Interdisziplinäre Beiträge zu einer aktuellen Diskussion. DOI: 10.22029/jlupub-3056.
- [8] United Nations (2025). United Nations Hate Speech online verfügbar unter <https://www.un.org/en/hate-speech/understanding-hate-speech/what-is-hate-speech>
- [9] United Nations (2019). United Nations Strategy and Plan of Action on Hate Speech. Online verfügbar unter <https://www.un.org/en/genocideprevention/documents/UN%20Strategy%20and%20Plan%20of%20Action%20on%20Hate%20Speech%2018%20June%20SYNOPSIS.pdf>, zuletzt geprüft am 26.04.2025.
- [10] Konrad-Adenauer-Stiftung (2024). Von Hate Speech in den sozialen Netzwerken zu extremistischer Gewalt? Online verfügbar unter <https://www.kas.de/de/web/extremismus/von-hate-speech-in-den-sozialen-netzwerken-zu-extremistischer-gewalt->, zuletzt geprüft am 25.04.2025.

- [11] Antidiskriminierungsstelle des Bundes (2015). Sexuelle Belästigung im Hochschulkontext – Schutzlücken und Empfehlungen. Online verfügbar unter [https://www.antidiskriminierungsstelle.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/Expertisen/expertise\\_sexuelle\\_belaestigung\\_im\\_hochschulkontext.pdf?\\_\\_blob=publicationFile#:~:text=Konsequenz%2oder%2oBetrachtung%2osexueller%2oBel%C3%A4stigung,T%C3%A4terin%2o kommt%2oes%2onicht%2oan,zuletzt%20gepr%C3%BCft%20am%2025.04.2025](https://www.antidiskriminierungsstelle.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/Expertisen/expertise_sexuelle_belaestigung_im_hochschulkontext.pdf?__blob=publicationFile#:~:text=Konsequenz%2oder%2oBetrachtung%2osexueller%2oBel%C3%A4stigung,T%C3%A4terin%2o kommt%2oes%2onicht%2oan,zuletzt%20gepr%C3%BCft%20am%2025.04.2025).
- [12] Suler, John (2004). The Online Disinhibition Effect. In *CyberPsychology & Behavior* (3). pp. 321-326. DOI: 10.1089/1094931041291295.
- [13] Fox, J., Cruz C., & Lee, J. Y. (2015). Perpetuating online sexism offline: Anonymity, interactivity, and the effects of sexist hashtags on social media. In *Computers in Human Behavior*, 52, pp. 436-442. DOI: 10.1016/j.chb.2015.06.024.
- [14] Opresnik, M. O., Yilmaz, O. (2016). Die Geheimnisse erfolgreichen YouTube-Marketings. Von YouTubern lernen und Social Media Chancen nutzen. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- [15] YouTube (2024). Nutzungsbedingungen. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/t/terms>, zuletzt geprüft am 26.04.2025.
- [16] Google (2024). Richtlinien zu Hassrede. Online verfügbar unter [https://support.google.com/youtube/answer/2801939?ref\\_topic=9282436](https://support.google.com/youtube/answer/2801939?ref_topic=9282436), zuletzt geprüft am 25.04.2025.
- [17] Bayerische Industrie- und Handelskammertag e.V. (2020). Erfolgreich Gründen: Ratgeber der bayerischen IHKs. Online verfügbar unter <https://www.ihk-muenchen.de/ihk/documents/Gr%C3%BCndung/Erfolgreich-Gr%C3%BCnden-Brosch%C3%BCre.pdf>, zuletzt geprüft am 26.04.2025.
- [18] Wotanis, L., & McMillan, L. (2014). Performing Gender on YouTube. *Feminist Media Studies*, 14(6), pp. 912-928. DOI: 10.1080/14680777.2014.882373.
- [19] Döring, N., & Mohseni, R. M. (2018). Male dominance and sexism on YouTube: results of three content analyses. *Feminist Media Studies*, 19 (4), pp. 512-524. DOI: 10.1080/14680777.2018.1467945.
- [20] Döring, N., & Bortz, J. (2016): *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. DOI: 10.1007/978-3-642-41089-5.

## KONTAKT



**Hana Dabdoub, M.A.**

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

[h.dabdoub@oth-aw.de](mailto:h.dabdoub@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Gabriele M. Murry, M.B.A. (USA), M.H.R. (USA)**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Weiden Business School  
Head of Institute of Psychology &  
Behavioral Science (IPBS)  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[g.murry@oth-aw.de](mailto:g.murry@oth-aw.de)

# Evaluation of the Educational Impact of the Simulation Development Process through Co-Creation

## Zusammenfassung

Diese Studie bietet eine umfassende Evaluation dreier innovativer Workshop-Interventionen zur Verbesserung der Kompetenzen von Studierenden im Bereich Simulationsdesign und digitale Transformation. Die Arbeit wurde im Rahmen des von der *Stiftung Innovation in der Hochschullehre* geförderten Projekts „*MindShift*“ durchgeführt und nutzte ein Prä-Post-Umfragedesign, um die pädagogischen Auswirkungen der Workshops *Mind Canvas I* (n = 35), *Mind Canvas II* (n = 26) und *ShiftConnect* (n = 7) an der OTH Amberg-Weiden zu bewerten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Workshops keine statistisch signifikante Veränderung des Selbstbewusstseins der Teilnehmenden bewirkten, jedoch wirksam zur Verbesserung anderer Lernergebnisse beitrugen. Der *Mind Canvas II*-Workshop schuf eine stark kollaborative Umgebung, wobei die Teamarbeit im Mittel mit 6,19 auf einer 7-stufigen Skala bewertet wurde. Die Integration von Technologie führt zu gemischten Erfahrungen. Ca. 34 % der Teilnehmenden berichteten von Schwierigkeiten mit Software (wie Figma, Miro, Canva usw.). Diese Ergebnisse legen nahe, dass ein praxisorientierter Ansatz des Simulationsdesigns eine vielversprechende Methode zur Verbesserung praktischer Fähigkeiten und der Zusammenarbeit ist. Obwohl die geringe Stichprobengröße der Studie für den *ShiftConnect*-Workshop die Zuverlässigkeit dieser Ergebnisse einschränkt, weisen die Ergebnisse insgesamt auf die Notwendigkeit hin, pädagogische und technische Unterstützung zu integrieren, um effektive neue Lerntechnologien zu schaffen.

## Abstract

This study provides a comprehensive evaluation of three innovative workshop interventions designed to improve students' simulation design and digital transformation competencies. Conducted as part of the “*MindShift*” project financed by *Stiftung Innovation in der Hochschullehre*, this paper used a pre-post survey design to assess the educational impact of the *Mind Canvas I* (n = 35), *Mind Canvas II* (n = 26) and *ShiftConnect* (n = 7) workshops at OTH Amberg-Weiden.

The findings indicate that the workshops did not produce a statistically significant change in participants' self-reported confidence, but they were effective in enhancing other learning outcomes. The *Mind Canvas II* workshop created a highly collaborative environment, with teamwork rated at a mean of 6.19 on a 7-point scale. Technology integration created mixed experiences. Difficulties with software (such as Figma, Miro, Canva, etc.) were reported by 34.5 % of participants. These results suggest that a hands-on, simulation-designing approach is a promising method for enhancing practical skills and collaboration. Though the study's small sample size for the *ShiftConnect* workshop limits the reliability of those findings, the results overall indicate the need for integrating pedagogical and technical support to create effective new learning technologies.

## 1 Introduction

The world is experiencing numerous innovative approaches to teaching and learning in higher education [1].

Simulation-based learning is now regarded as a transformative pedagogical method that bridges the gap between theoretical knowledge and practical application for learners in a small simulated setting [2]. This ap-

proach aligns with Kolb's Experiential Learning Theory [3], which emphasises the importance of concrete experience, reflective observation, abstract conceptualisation, and active experimentation in learning.

The *MindShift* project, funded by the *Freiraum* program of the *Stiftung Innovation in der Hochschullehre*, represents a significant initiative to integrate extended, virtual, augmented, and mixed reality (XR/VR/AR/MR) simulations into higher education. This project aims to develop a modern and innovative digital learning process that can enrich university teaching using immersive technologies. The authors evaluated three workshop interventions at the onset of this project: the *Mind Canvas* workshops, which were focused on business simulation building, and the *ShiftConnect* workshop, which was centred on digital transformation simulation ideation.

Various types of educational research have shown the effectiveness of simulation-based training across various domains. Meta-analytic evidence shows that simulation games can enhance post-training self-efficacy by 20 %, declarative knowledge by 11 %, and procedural knowledge by 14 % compared to traditional instructional methods [4].

This study indicates the need for empirically evaluating immersive learning technologies in higher education settings guided by the following research questions:

**R1** To what extent do simulation-based workshops improve students' decision-making confidence and learning outcomes?

**R2** What are the differential effects of simulation building versus simulation ideation workshops?

**R3** How do participants' prior experiences and demographic characteristics influence learning outcomes?

## 2 Literature Review

### 2.1 Theoretical Foundations of Simulation-Development-Based Learning

Simulation-developing-based learning is grounded in several key traditional educational theories. Constructivist learning theory emphasises that learners actively construct knowledge through experience and reflection [5]. In simulation-building environments, students engage in authentic problem-solving activities that mirror real-world challenges, facilitating deep learning and knowledge retention [6]. Self-determination theory provides another important theoretical framework, highlighting the importance of autonomy, competence, and relatedness in promoting intrinsic motivation [7]. Simulation-developing-based learning environments

can satisfy these basic psychological needs by providing learners choices, optimal challenges, and collaborative opportunities.

### 2.2 Effectiveness during the Development of Business Simulations

Business simulations are powerful tools for developing business competencies because they immerse students in real-world challenges [8]. This experiential learning approach significantly improves problem-solving, financial and production management, and marketing skills [9]. According to Hanafiah [10], participation in a business simulation led to statistically significant gains in these areas in a longitudinal study of 120 students and noticeable improvements in students' understanding of real company issues, which can create the ability to bridge the gap between theoretical knowledge and practical application. This process helps to understand business concepts and forces developers to actively construct a business system model. Developers are also engaged in system-level thinking by designing the simulation's rules, variables, and decision-making logic [11].

### 2.3 Digital Transformation and Educational Technology

The world has recently been observing more integration of modern technologies in education to prepare students for digitally transformed workplaces. Extended, virtual, augmented, and mixed reality technologies have been used to create immersive learning experiences.

## 3 Methodology

### 3.1 Study Design, Context, and Participants

This study employed three sets of pre-post surveys to evaluate the effectiveness of different simulation design workshops at OTH Amberg-Weiden. The *Mind Canvas I* workshop ( $n = 35$ ) included participants with a mean age of 27.3 years ( $SD = 4.45$ , range 21-36), of whom 58.8 % were male and 41.2 % female. Most (94.1 %) had 1-3 years of professional experience beyond student or minijobs, while only 11.8 % reported prior exposure to business simulations. The *Mind Canvas II* workshop ( $n = 26$ ) included 53.8 % male and 46.2 % female participants, with both *Mind Canvas* cohorts primarily drawn from the International Business Bachelor program. The *ShiftConnect* workshop involved seven participants (6 female, 1 male) from the Applied Business Psychology Master's program, with data collected pre- and post-workshop. Its small sample reflected the program's specialized focus on digital transformation competencies and advanced concepts.

## 3.2 Workshop Interventions

### 3.2.1 Mind Canvas Workshop

The *Mind Canvas I & II* workshops were focused on developing business simulation prototypes using collaborative digital tools. Participants worked in teams to design and develop interactive simulations using a Miro board for brainstorming, Figma for user interface design, and Canva for visual assets. The workshops emphasised the design process, where students continuously refined their prototypes based on feedback and testing. Four groups successfully developed entry-level business simulation games.

### 3.2.2 ShiftConnect Workshop

The *ShiftConnect* workshop concentrated on digital transformation simulation ideation to understand the impact of emerging technologies on business environments. This workshop emphasised strategic thinking about digital transformation challenges and opportunities for innovation. Participants engaged in collaborative activities to develop simulation concepts addressing real-world digital transformation scenarios in business simulation.

## 3.3 Measurement Instruments and Data Analysis

The pre-workshop surveys measured motivation, self-efficacy, technology acceptance, and learning preferences using 7-point Likert scales. Decision-making confidence was assessed using a 10-point scale. Post-workshop surveys evaluated learning outcomes, skill development, and technology usage. Qualitative data were collected through open-ended questions about the most significant takeaways and suggestions for improvement.

Descriptive statistics were calculated for all variables, including means, standard deviations, and frequency distributions. All statistical analyses were conducted using Jamovi or Excel.

## 4 Results

### 4.1 Mind Canvas I Outcomes

#### 4.1.1 Decision-Making Confidence

Based on decision-making confidence in complex business scenarios, the *Mind Canvas I* workshop did not significantly change participants' confidence from experience. The paired samples t-test did not show a statistically significant difference between the pre- and post-workshop scores,  $t(33.0) = 0.195$ ,  $p = 0.846$ , indicating the observed change was not a result of the intervention.

### 4.1.2 Learning Outcomes

Multiple learning dimensions showed positive changes following the workshop intervention from *Mind Canvas I* (see Figure 1).

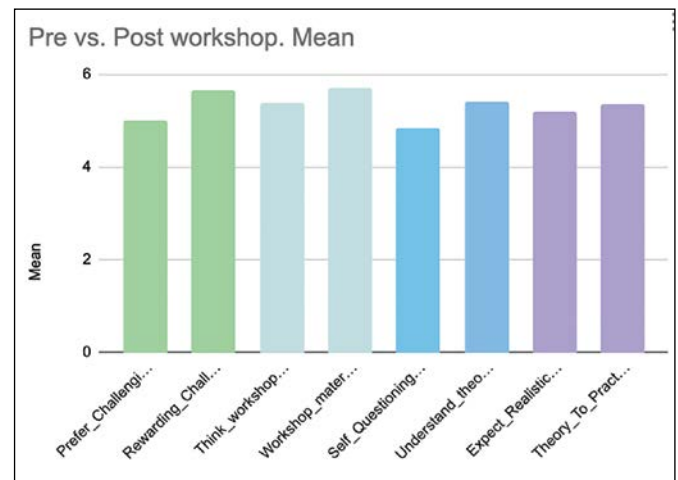


Figure 1: Comparison of key learning outcomes before and after the *Mind Canvas I* workshop on a 7-point Likert scale ( $n = 35$ ).

The bar chart shows that the *Mind Canvas I* workshop improved motivation and learning, with perceived challenge rewards rising from  $M_1 = 5.00$  to  $M_2 = 5.65$  and career value to  $M_3 = 5.71$ .

### 4.2 Mind Canvas II Outcomes

#### 4.2.1 Technology Adoption and Collaboration

Post-workshop surveys showed mixed experiences with digital tools. While 34.5 % of participants reported no difficulties with technology, others encountered challenges ranging from unfamiliarity with new platforms to initial learning curves. However, a paired samples t-test comparing pre-workshop confidence in using digital tools ('I am confident using digital tools or technologies in learning') with post-workshop confidence in applying those tools to real-world business problems ('I am more confident applying digital tools to solve real-world challenges') revealed no statistically significant difference ( $t(25) = -1.11$ ,  $p = 0.276$ ), indicating that the *Mind Canvas II* workshop did not produce a measurable change in self-reported digital confidence in this sample.

Despite these challenges, participants generally found the digital tools helpful for collaboration and creative expression. Team communication was rated highly ( $M = 6.19$ ,  $SD = 0.75$ ), which indicates effective collaborative learning environments in the *Mind Canvas II* workshop.

### 4.3 *ShiftConnect* Workshop Outcomes

#### 4.3.1 Digital Competency Development

The *ShiftConnect* workshop did not show notable effects across different digital competency domains. A paired samples t-test was conducted to examine differences in participants' familiarity with digital transformation challenges in pre- and post-workshop. No statistically significant change in familiarity was observed in results.  $t(6) = -0.60, p = 0.57$ , indicates participants' self-reported knowledge of these challenges remained stable across the intervention.

## 5 Discussion

### 5.1 Theoretical & Practical Implications for Higher Education

This preliminary study found mixed outcomes across the three workshops. While the *Mind Canvas I* and *II* workshops did not produce a significant change in participants' self-reported confidence, they did show strong evidence of positive collaboration and learning experiences. The *Mind Canvas II* workshop's high rating for teamwork ( $M = 6.19$ ) indicates that it effectively increased a collaborative environment. For the *ShiftConnect* workshop, the small sample size ( $n = 7$ ) makes it difficult to draw any reliable conclusions about its effectiveness.

### 5.2 Limitations and Future Directions

Several limitations should be acknowledged when interpreting these findings. The lack of random assignment and control groups prevents definitive causal conclusions about the workshop effectiveness. The relatively short-term follow-up period also limits long-term learning retention and transfer of understanding.

Future research should investigate the observed improvements through longitudinal follow-up studies. Examining the transfer of simulation design skills to other learning contexts would provide valuable insights into the broader educational value of these interventions. Comparative studies examining different simulation formats and delivery methods also indicate optimal pedagogical approaches.

Integrating emerging technologies such as artificial intelligence and advanced virtual reality applications can be an exciting addition to the simulation-developing process. Future iterations of the *MindShift* project should explore these technological possibilities while focusing on pedagogical effectiveness.

## 6 Conclusion

This evaluation of the *MindShift* project's workshops provides strong evidence for the educational effectiveness of the simulation building process. The *Mind Canvas* workshops demonstrate that a hands-on approach can significantly enhance student engagement and increase critical skills like teamwork and collaboration. While these short-term interventions did not produce statistically significant changes in self-reported confidence, the consistently high ratings for collaboration ( $M = 6.19$ ) show that they successfully created a positive and effective learning environment. The study also highlights the importance of providing adequate technical support, as mixed experiences with new digital tools need to help students overcome initial learning curves. Ultimately, this project offers a valuable model for higher education, showing that integrating innovative technologies with collaborative learning can effectively prepare students for the complex, real-world challenges of their future careers.

*Note: The authors used Perplexity and Grammarly for sentence structures.*

---

### References:

- [1] Orr, L. (2024). Educational technology in higher education. In *Advances in information quality and management* (pp. 1-21). <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7366-5.ch083>
- [2] Ghani, M. G. A., & Mohamad, N. (2025). Enhancing students' business plan learning through experiential business plan simulation. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, IX(V), 4721-4732. <https://doi.org/10.47772/ijriss.2025.905000363>
- [3] Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: experience as the source of learning and development*. Prentice-Hall.
- [4] Sitzmann, T. (2011). A META-ANALYTIC EXAMINATION OF THE INSTRUCTIONAL EFFECTIVENESS OF COMPUTER-BASED SIMULATION GAMES. *Personnel Psychology*, 64(2), 489-528. <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.2011.01190.x>
- [5] Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes* (M. Cole, V. John-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman, Eds.). Harvard University Press.

- [6] Francom, G. (2018). Ten Steps to Complex Learning: a Systematic Approach to Four-Component Instructional Design (3rd ed.), by Jeroen J. G. van Merriënboer and Paul A. Kirschner. TechTrends, 62(2), 204-205. <https://doi.org/10.1007/s11528-018-0254-0>
- [7] Bouffard, L. (2017). Ryan, R. M. et Deci, E. L. (2017). Self-determination theory. Basic psychological needs in motivation, development and wellness. New York, NY: Guilford Press. Revue Québécoise De Psychologie, 38(3), 231. <https://doi.org/10.7202/1041847ar>
- [8] Strickland, P. (2023). Business-Simulation Pedagogy, Assessments, and Barriers to entry in an Australian educational environment. International Journal of Smart Business and Technology, 11(2), 1-14. <https://doi.org/10.21742/ijstb.2023.11.2.01>
- [9] Pulakos, E. D., Hanson, R. M., Arad, S., & Moye, N. (2015). Performance management can be fixed: an On-the-Job experiential learning approach for complex behavior change. Industrial and Organizational Psychology, 8(1), 51-76. <https://doi.org/10.1017/iop.2014.2>
- [10] Hanafiah, M. H. (2022). The effectiveness of business simulation: a longitudinal study. [www.academia.edu](https://www.academia.edu). [https://www.academia.edu/71083792/The\\_effectiveness\\_of\\_business\\_simulation\\_a\\_longitudinal\\_study](https://www.academia.edu/71083792/The_effectiveness_of_business_simulation_a_longitudinal_study)
- [11] Jonassen, D. (1999). Designing constructivist learning environments. In C. Reigeluth, (Ed.), Instructional-design theories and models A new paradigm of instructional theory (pp. 215-239). University Park Pennsylvania State University. – References – Scientific Research Publishing. (n.d.). <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=800372>

### Funding provider:



Stiftung  
Innovation in der  
Hochschullehre

## KONTAKT



**Md Jawadur Rahman, M.A.**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Weiden Business School  
Institute of Psychology &  
Behavioral Science (IPBS)  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[m.rahman3@oth-aw.de](mailto:m.rahman3@oth-aw.de)



**Prof. Dr. Gabriele M. Murry, M.B.A. (USA), M.H.R. (USA)**

Ostbayerische Technische  
Hochschule (OTH) Amberg-Weiden  
Fakultät Weiden Business School  
Head of Institute of Psychology &  
Behavioral Science (IPBS)  
Hetzenrichter Weg 15  
92637 Weiden

[g.murry@oth-aw.de](mailto:g.murry@oth-aw.de)



## Inserentenverzeichnis

Siemens AG .....	15
HORN Glass Industries AG .....	61
Volksbank Raiffeisenbank Nordoberpfalz eG .....	61
Bayernwerk AG .....	101
VR Bank Amberg-Sulzbach eG .....	157
Amberger Freunde der OTH Amberg-Weiden e.V. ....	157
Krones AG .....	157
Förderverein der OTH Weiden e.V. ....	157
Promotionszentrum OTH Amberg-Weiden .....	179
Novem Car Interior Design GmbH .....	179
HT HEALTH TEC GmbH .....	179
OTH Professional.....	179
Nabaltec AG .....	203
IGZ Ingenieurgesellschaft für logistische Informationssysteme mbH.....	203



## IMPRESSUM

### **Herausgeber**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Präsident Prof. Dr. med. Clemens Bulitta  
Kaiser-Wilhelm-Ring 23 | 92224 Amberg  
Hetzenrichter Weg 15 | 92637 Weiden  
[www.oth-aw.de](http://www.oth-aw.de)

### **Redaktion**

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden  
Andrea Breitschaft | Institut für Angewandte Forschung (IAF)

### **Inhalt/Bildmaterial/Copyright**

Die Verantwortung für Inhalt und Bildmaterial der Beiträge sowie das Copyright liegt bei den jeweiligen Autoren.

### **Erscheinungstermin**

März 2026

### **ISSN-Nummer:**

2365-1997

Die Onlineversion des Forschungsberichtes finden Sie unter: [www.oth-aw.de/forschungsbericht](http://www.oth-aw.de/forschungsbericht)



**OTH**  
**Amberg-Weiden**