

FACHHOCHSCHULE
WIENER NEUSTADT
University of Applied Sciences – Austria

PROCEEDINGS 2024

Mechatronik | Mechatronics

Kurzfassungen der Masterarbeiten
Master Studiengang Mechatronik
Fachhochschule Wiener Neustadt

Abstracts of Master Theses
Master's programme Mechatronics
University of applied sciences Wiener Neustadt

IMPRESSUM

Proceedings 2024 | Kurzfassungen der Masterarbeiten
Masterstudiengang Mechatronik

Herausgeber: Prof. (FH) Dipl.-Ing. Wolfgang Haindl

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher & weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht. Irrtümer & Satzfehler vorbehalten

Copyright FH Wiener Neustadt GmbH, 2025: Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, der Verbreitung, der Bearbeitung & Übersetzung sowie jeder Form von gewerblicher Nutzung, vorbehalten. Alle in diesem Tagungsband enthaltenen Angaben wurden nach bestem Wissen zusammengestellt & mit Sorgfalt kontrolliert. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Tagungsband enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Herausgeber & Institut übernehmen infolgedessen keine Verantwortung & werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entstehen, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

FH Wiener Neustadt GmbH
Johannes Gutenberg-Str. 3
2700 Wiener Neustadt
Tel.: +43 5 0421 1

Foto-Credits: FH Wiener Neustadt, stock.adobe.com

Satzherstellung: FH Wiener Neustadt, Johannes Gutenberg-Str. 3
2700 Wiener Neustadt

Druck: druck.at Druck- und Handelsgesellschaft mbH
Aredstr. 7 / EG / Top H 01, 2544 Leobersdorf

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort 5

DESIGN & CHARAKTERISIERUNG EINER MIKROWELLENKOPPLUNG
FÜR KALTE ATOME – Alexander Anderle BSc. 7

ACOUSTIC OPTIMISATION OF A LASER BEAM SCANNER
FOR AUGMENTED REALITY GLASSES – Lukas Bergmann, BSc. 11

BESTIMMUNG DER MODALEN PARAMETER EINES ZWEISCHEIBENTRIBOMETERS FÜR DIE
ENTWICKLUNG EINES DIGITALEN PROTOTYPS – Andreas Biederbeck, BSc 14

AUTOMATISIERTE FEHLERDETEKTION BEI ABGASTURBOLADERN – Mert Bingöl, BSc. 18

ENTWICKLUNG EINER TESTAUTOMATISIERUNG FÜR DSL-MODEMS VON
TELEKOMMUNIKATIONSUNTERNEHMEN – Felix Führinger, MSc. 21

PERFORMANCE MODEL EINER VANADIUM-REDOX-FLOW-BATTERIE – Florian Gruber, BSc. 27

ENTWICKLUNG EINES POWER-HIL-SYSTEMS FÜR TESTS EINES ELEKTRISCHEN
ENERGIESPEICHER-SYSTEMS – Ing. Stefan Kern, BSc. 33

ENTWICKLUNG EINER AUTOMATISIERUNGSZELLE FÜR EINE SPRITZGUSSMASCHINE
– Fabian Leser, BSc. 36

OPTISCHE ANALYSE DES STARTSPRUNGES BEIM SCHWIMMSPORT
MIT HILFE AUTOMATISCHER MARKER ERKENNUNG – Chunping Li, BSc 41

SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSE UND MESSTECHNISCHE VERIFIZIERUNG
DES CROSSTALKS AUF HIGH-SPEED LEITERPLATTEN – Markus Mayerhofer, BSc.. 47

SYNTHESE UND SIMULATION VON MIKROFLUIDIK NETZWERKEN MITTELS COMSOL
UND MATLAB – Iman Moradiberijani, BSc. 52

ENTWICKLUNG EINES ZONALEN ENERGIEVERTEILSYSTEMS FÜR DIE
AUTOMOBILINDUSTRIE – DI FH Manuel Reischer 56

FUßGÄNGERERKENNUNG MIT HILFE VON 3D-LIDAR DATEN – Amin Same Nasayeh, BSc. 62

EXPLAINABLE NEURAL NETWORKS – Nina Schmirl, BSc. 65

ENTWICKLUNG EINES PRÜFGERÄTES ZUR AUTOMATISIERTEN FUNKTIONSPRÜFUNG
VON RELAIS – Kevin Schuh, BSc 68

ENTWICKLUNG UND BAU EINES THERMISCH REGULIERBAREN
MECHANISCHEN PRÜFSTANDS FÜR KUNSTSTOFFE – Timo Tangel, BSc. 72

QUANTIFIZIERUNG UND OPTIMIERUNG DES MECHANISCHEN VORSCHUBS FÜR
EIN INDUSTRIELLES STREOLITHOGRAPHISCHES 3D DRUCK SYSTEM – Nina Valvoda, BSc. 78

ERFORSCHUNG UND ENTWICKLUNG EINER ADDITIV GEFERTIGTEN
POLYMEREN OPTISCHEN LINSE – Josip Vidović, BSc. 82

FOREWORD

The rapid advancements in intelligent technologies are shaping our era and presenting new challenges for both industry and academia. Mechatronics, as an interdisciplinary key technology, combines mechanics, electronics, computer science, and data-driven systems such as artificial intelligence and machine learning to develop innovative solutions.

In an increasingly interconnected and digitalized world, new demands are emerging in areas such as mobility, healthcare, energy, and environmental protection. Meeting these demands requires not only technological innovation but also a commitment to ensuring that developments are sustainable and socially responsible.

At the Mechatronics program of the University of Applied Sciences Wiener Neustadt, we actively embrace these challenges. By continuously advancing our curriculum and fostering close collaboration with industry partners, we prepare our students for the dynamic world of high-tech industries. Our goal is to empower them to actively shape change.

This conference volume highlights the diversity and depth of the Mechatronics program at our university. It demonstrates how our students analyze technological challenges and develop innovative solutions to meet the demands of a connected world.

My sincere thanks go to the supervising professors and industry partners, whose support and expertise have significantly contributed to the successful completion of these projects.

VORWORT





Prof. (FH) Dipl.-Ing.
Wolfgang Haindl
Studiengangsleitung

Die rasanten Fortschritte intelligenter Technologien prägen unsere Zeit und stellen Industrie und Wissenschaft vor neue Herausforderungen. Die Mechatronik als interdisziplinäre Schlüsseltechnologie verbindet Mechanik, Elektronik, Informatik sowie datengetriebene Systeme wie künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen, um innovative Lösungen zu entwickeln.

In einer zunehmend vernetzten und digitalisierten Welt entstehen neue Anforderungen in Bereichen wie Mobilität, Gesundheitsversorgung, Energie und Umweltschutz. Dies erfordert nicht nur technologische Innovation, sondern auch die Verantwortung, Entwicklungen nachhaltig und gesellschaftlich sinnvoll zu gestalten.

Am Studiengang Mechatronik der Fachhochschule Wiener Neustadt nehmen wir diese Herausforderungen aktiv an. Durch die Weiterentwicklung unseres Curriculums und den engen Austausch mit Industriepartnern bereiten wir unsere Studierenden auf die dynamische High-Tech-Welt vor. Unser Ziel ist, sie zu befähigen, Veränderungen aktiv mitzugestalten.

Dieser Konferenzband zeigt die Vielfalt und Tiefe der Mechatronik-Ausbildung an unserem Studiengang. Er verdeutlicht, wie unsere Studierenden technologische Herausforderungen analysieren und innovative Lösungen entwickeln, die den Anforderungen einer vernetzten Welt gerecht werden.

Mein Dank gilt den betreuenden Professorinnen und Professoren sowie den Unternehmenspartnern, deren Unterstützung und Expertise die Entstehung dieser Arbeiten maßgeblich gefördert haben.

DESIGN & CHARAKTERISIERUNG EINER MIKROWELLENKOPPLUNG FÜR KALTE ATOME

Alexander Anderle, BSc.

Kurzfassung: *Im Rahmen dieser Arbeit wurden die ersten Schritte zur Realisierung einer effektiven Einkopplung von Mikrowellen in den Fangdraht eines „kalten Atom" Experiments getan. Hierfür wird ein ausgearbeitetes Testdesign auf einer Prototypenplatine integriert. Zur Verifizierung der Ergebnisse wird eine Finite Elemente Simulation der Testplatine aufgesetzt und entsprechende Messungen durchgeführt. Als Ergebnis der Simulationen und Messungen erhält man die S-Parameter der Platinenports, sowie die Verteilung des E- und H-Feldes entlang der Falle. In der zweiten Iteration wird ein optimiertes Design entwickelt, welches auf den gewonnenen Erkenntnissen basiert. Das Resultat ergibt eine bessere Konvergenz zwischen Simulation und Messung, eine verbesserte Übertragung des HF-Signals auf die Fangstrecke, sowie weniger Interferenzerscheinungen.*

Schlüsselwörter: *HF, Bias-Tee, Hyperfeinübergang, Atomfalle*

1. EINLEITUNG

Mit Hilfe von kalten Atomen ist es möglich diverse hochpräzise Messungen und mittels Quantum Computing komplexe Berechnungen durchzuführen. Dies kann zur Ermittlung von elementaren Naturkonstanten (zB. Gravitationskonstante, Hyperfeinkonstante,…) mit hoher Genauigkeit in der Sensorik, oder zur Bereitstellung von Qubits für Quantencomputing verwendet werden. Hierzu werden gefangene und präzise manipulierbare Atome benötigt. Der erste Schritt besteht dabei im Fangen und Initialisieren der Atome mittels magnetischer Mikrofalle oder auch kalte Atomfalle genannt. Hierbei sollen Atome durch Laser gekühlt werden, was die thermische Bewegung reduziert, um sie anschließend durch ein Magnetfeld zu fangen. Die gewünschten energetischen Zustände des Atoms entstehen durch das Einbringen einer hochfrequenten elektromagnetischen Welle [Böhi 2009]. Diese Arbeit widmet sich dem Design und der Charakterisierung eines weiteren Teils zur Fertigstellung einer „kalten Atom"-Falle, zur Manipulation mittels Mikrowellenfeldern [Schinkovits 2023]. Konkret wird ein Simulationsmodell des Aufbaus erstellt und durch Messungen des realen Platinen-großen Prototypentestaufbaus verifiziert. Als Ergebnis entsteht ein Simulationsmodel zur weiteren Miniaturisierung auf Chip Größe, sowie das dafür benötigte Know-how über das Verhalten einer elektromagnetischen Welle im Hochfrequenzbereich auf einer Kopplungsstrecke.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Um die gewünschten Gegebenheiten zum Fangen und Manipulieren von Atomen herzustellen, muss ein Strom in der Höhe von ~2 Ampere, sowie eine hochfrequente elektromagnetische Welle mit einer Frequenz von 6,835 GHz zusammen auf einem Leiter geführt werden. Nur dann können im Bereich direkt über dem Leiter Atome gefangen und manipuliert werden. Das bedeutet für den Aufbau der Platine und in weiterer Folge des Chips, dass eine Strecke für beide Signale, ohne dabei die jeweils andere Quelle zu beeinflussen, designed werden muss. Des Weiteren muss dieser Aufbau ein hochfrequenzgerechtes Design vorweisen, um die Welle nicht zu stark durch Reflexionen zu verändern. In Abb. 1 wird ein Aufbau eines State of the Art Atom Chips zur besseren Vorstellung gezeigt.

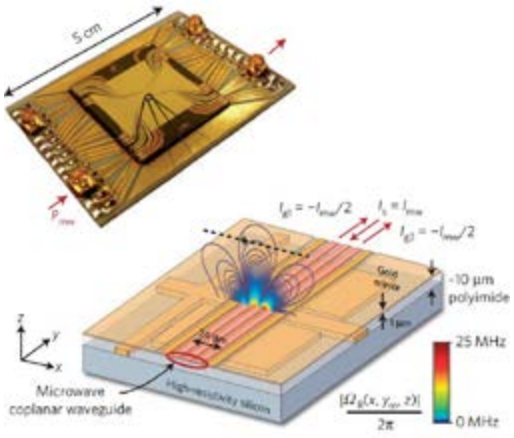


Abb. 1: Atom Chip aus [Böhi 2009]. Im oberen Bild ist eine Photographie des Chips dargestellt. Im unteren Bild ist eine schematisch dargestellte Vergrößerung des Bereichs des Experiments sichtbar.

3. MATERIALIEN UND METHODEN

Von dem eben beschriebenen System soll nun der Pfad, welcher zum Fangen der Atome genutzt wird, analysiert, designed und verstanden werden. In erster Instanz wird hierfür ein Testaufbau durch neun Schaltungen mit unterschiedlichen Designs mittels der PCB-Design Software Altium Designer 24.6.1 erstellt. In weiterer Folge wird ein Simulationsmodell des Aufbaus in Comsol Multiphysics 5.4 wie in Abb. 2 zu sehen erstellt [Nilsson 2013]. Weiters werden einige Designparameter durch das KiCad 7.0 Berechnungstool, sowie das bereits erwähnte Altium berechnet und simuliert, um eine erste Abschätzung des Verhaltens der Platine zu bekommen.

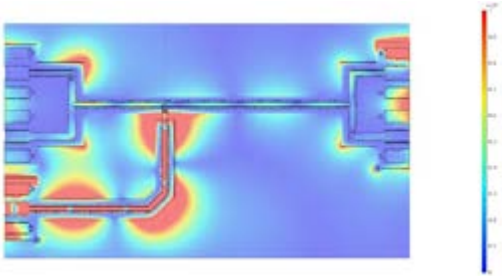


Abb. 2: Simulation des E-Feldes der ersten Testplatine, Schaltung 1.2, mittels Comsol 5.4

Der vorhin beschriebene Testaufbau wird anschließend als Prototypenplatine bei der Firma Multi Circuit Board hergestellt, bestückt und vermessen. Bei der Vermessung werden S-Parameter, sowie Minima und Maxima des E- und H-Feldes vermessen. Hierbei zeigen die S-Parameter wie in Abb. 3 dargestellt und durch Formel (1) beschrieben [Pozar 2005], das Verhältnis zwischen eingebrachter und am Ausgang gemessener Energie des Device Under Test (DUT) auf.

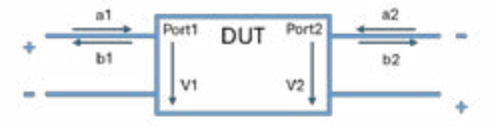


Abb. 3: Blockdiagramm der S-Parameter zur Aufstellung der Streuparameter-Matrix

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Die simulierten Werte werden den gemessenen gegenübergestellt und auf Richtigkeit überprüft. Die gewonnenen Erkenntnisse gehen in einen optimierten, zweiten Testaufbau ein, welcher wie schon beim ersten Testaufbau beschrieben, designed, simuliert und verifiziert wird. Das Ergebnis der Simulation ist in Abb. 4 dargestellt.

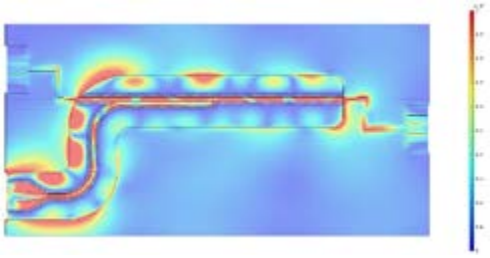


Abb. 4: Simulation des E-Feldes der optimierten Testplatine, Schaltung 6.2, mittels Comsol 5.4

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Die Signalquelle ist im Gesamtprojekt bereits definiert und wird in dieser Arbeit durch einen externen Hochfrequenzgenerator realisiert. Sie wird bei der Optimierung und der Simulation als ideale Sinusquelle mit einer Frequenz von 6,835 GHz angenommen. Bei der Auslegung der Kopplungsstrecke auf dem PCB bestehen für die Optimierungsmöglichkeiten keine Einschränkungen. Die Anbindung zwischen den verschiedenen Teilen der Leitung ist durch SMA-Konnektoren realisiert, welche ebenfalls eine nicht vernachlässigbare Impedanz haben. Das Design der Testplatine ist in Abb. 6 zu sehen. Zur Messung wird das Messequipment der Fachhochschule Wiener Neustadt verwendet. Hierfür stehen diverse Messinstrumente zur Verfügung, wie zB. ein Vektor Network Analyzer. Dieser VNA mit der Bezeichnung 8720ET Transmission/Reflection Vector Network Analyzer, 50 MHz bis 20 GHz von Agilent wird zur Vermessung der S-Parameter, sowie des E- und H-Felds verwendet. Die Messung der S-Parameter erfolgt im gängigen Verfahren. Hierbei wird im ersten Schritt die Dämpfung der Messkabel hinaus kalibriert. Anschließend werden diese an die Testplatine angeschlossen und der Wert der Dämpfung bei der gewünschten Frequenz abgelesen. Bei der Messung von E- und H-Feld ist eine 3D-gedruckte Messhalterung zur Befestigung und genaueren Positionierung der Antennen entwickelt worden. Diese ist in Abb. 5 zu sehen. Die Antenne wird dann anstatt des Ausgangsports an den VNA angeschlossen.

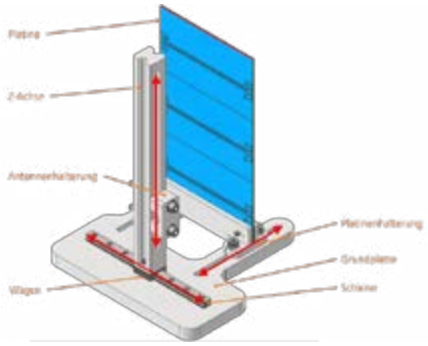


Abb. 5: 3D-gedruckte Messhalterung zur Vermessung des E- und H-Feldes der Testplatinen

Die Simulation besteht aus mehreren Teilen und soll das Modell unter mehreren Konditionen wie variabler Frequenz, Dämpfung und verschiedenen Komponenten testen. Für die Entwicklung und Überprüfung des ersten Konzepts wird eine Prototypenplatine wie in Abb. 6 gezeigt designed.

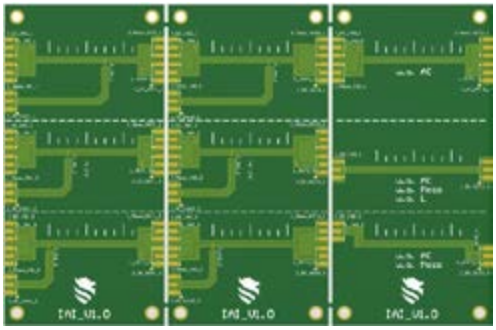


Abb. 6: Design der Testplatine ohne bestückte Komponenten

Anschließend folgen die Bestellung und Vermessung dieser Platinen. Das Simulationsmodell mittels Comsol dient zur Verifikation zwischen Simulation und realer Messung. Die Ergebnisse der Messungen sind beim Verbesserungskonzept berücksichtigt und fließen in das optimierte Design, welches in Abb. 7 zu sehen ist ein.

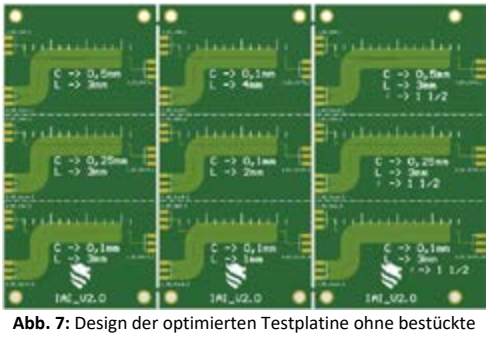


Abb. 7: Design der optimierten Testplatine ohne bestückte Komponenten

Um die ausgewählten Optimierungen auf das System anzuwenden und zu überprüfen wird abermals die Software Altium Designer zur Hilfe genommen. Diese ermöglicht das impedanzgerechte Design der Leitungen und einige andere Analysen. Hierbei kann die Laufzeit der Welle auf der Leitung, die Abweichung der Impedanz durch die gewählte Struktur und die Verluste im Dielektrikum berechnet werden. Eine Überprüfung auf Herstellbarkeit und das Einbringen von Designeinschränkungen kann durch die Eingabe der Herstellerdaten bewirkt werden [Moser 2020]. Dabei ist der Layerstack in Abb. 8 entstanden.



Abb. 8: Layerstack der in Altium Designer erstellten Testplatine und der optimierten Version der Testplatine [Altium Designer]

Als abschließende Analyse wird ein finales Comsol Modell des Aufbaus erstellt, das als Basis für die Weiterarbeit am Gesamtprojekt verwendet werden kann.

5. ERGEBNISSE

Die Messung der S-Parameter der ersten Testschaltung hat ergeben, dass eine elektromagnetische Welle mit einer Frequenz von 6.835 GHz, die vom Zuleitungskonnektor auf die Platine gebracht wird, sehr stark gedämpft bei den MESS-Konnektoren ankommt. Das ist auch aus Tab. 1 ersichtlich.

Schaltung	S11	S21	S31	S41	S51
Messung					
1_2	-2,3918	-21,727	-54,747	-53,361	-46,516
2_2	-0,238	-14,974	-33,266	-30,114	-34,873
3_2	-2,9065	-7,2592	-	-	-
Simulation					
1_2	-6,451	-19,532	-27,587	-35,863	-24,115
2_2	-1,814	-39,138	-43,675	-44,857	-40,391
3_2	-2,9128	-6,834	-	-	-

Tab. 1: Ergebnisse der S-Parametermessung der Testplatine

Diese starke Dämpfung entsteht durch die 90° Winkel in der Geometrie der Zuleitung, sowie bei der Verzweigung der Fangstrecke zu MESS- und Fangstrom-Konnektoren. Des Weiteren ist durch die genannte Verzweigung und den Übergang von Zuleitung auf die Fangstrecke jeweils ein Spannungsteiler entstanden, welcher zusätzlich für eine Abschwächung des Systems sorgt. Die S-Parameter der Fangstrom-Konnektoren weisen eine größere Dämpfung auf als die der MESS-Konnektoren, was die Dämpfungseigenschaften der Induktivitäten bestätigt [Stiny 2019]. Dieses Verhalten wurde durch die Vermessung auf Schaltung 3.3, welche zwei Induktivitäten auf der Strecke zwischen den beiden Ports hat und zur Vermessung verschiedener Werte dient, bestätigt. Die Messung der S-Parameter der optimierten Testplatine zeigt in Tab. 2, dass durch das Entfernen der diskreten Bauteile und die Verbesserung der Übertragungsstrecke, sowie das Entfernen der MESS-Strecke zu einer Reduzierung der Dämpfung von Zuleitungs-Konnektor zu den Fangstrom-Konnektoren geführt hat.

Schaltung	S11	S21	S31
Messung			
4_2	-1,899	-28,315	-24,287
5_2	-1,675	-27,415	-26,389
6_2	-1,601	-26,598	-28,925
Simulation			
4_2	-3,4289	-40,576	-46,357
5_2	-3,4092	-41,852	-45,154
6_2	-2,7873	-43,044	-43,888

Tab. 2: Ergebnisse der S-Parameter Messung der optimierten Testplatine

Die Dämpfung ist dennoch ausreichend, um die DC-Quelle von der hochfrequenten elektromagnetischen Welle zu trennen. Bei der Vermessung der Minima und Maxima des E- und H-Feldes mit Hilfe von Antennen ist eine Übertragung der hochfrequenten elektromagnetischen Welle auf die Fangstrecke der Testplatine zu erkennen. Durch die Interpolation mittels Makima-Funktion ist eine Interpretation des vermuteten Verlaufs über die Fangstrecke möglich. Dieser zeigt in Abb. 9, dass die Welle teilweise stark von Interferenzerscheinungen beeinflusst wird.

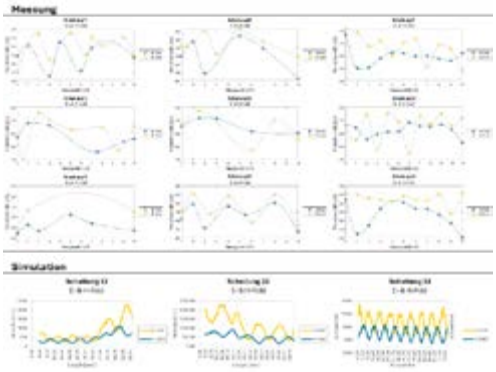


Abb. 9: Mess- und Simulationsergebnisse des E- und H-Feldes der Testplatine

Ist die Kopplung der Zuleitungsstrecke ausreichend weit vom Zuleitungs-Konnektor entfernt, so ergibt sich auf dem verbleibenden, längeren Teil der Fangstrecke eine ausgeprägte Bildung von Minima und Maxima. Die Simulationsergebnisse zeigen ebenfalls, dass im Gegensatz zur Schaltung 3.2, bei der die Welle von Eingangs-Konnektor zu Ausgangs-Konnektor ohne Hindernisse laufen kann, eine durch Interferenz hervorgerufene Beeinflussung des Verlaufs stattfindet. Die Vermessung der optimierten Platine ergibt eine deutlich bessere Kopplung der Welle von Zuleitung zu Fangstrecke. Das optimierte Design verursacht weniger Interferenzerscheinungen was sich in einem

konstanten Abstand der Minima und Maxima bei allen Designs wie in Abb. 10 gezeigt ausdrückt.

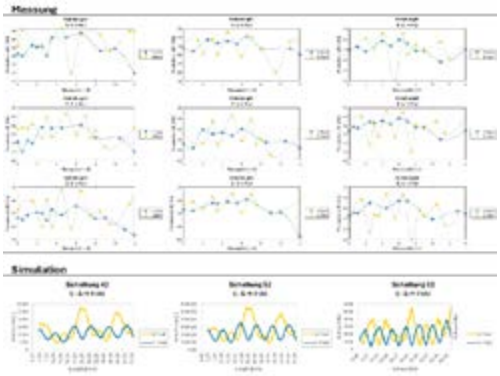


Abb. 10: Mess- und Simulationsergebnisse des E- und H-Feldes der optimierten Testplatine

Eine Reduktion der Dämpfung sei hier ebenfalls vermerkt, wird jedoch nicht zur quantitativen Auswertung herangezogen, da die Messgenauigkeit durch den prototypenhaften Aufbau der Messumgebung diesen Unterschied hervorrufen könnte. Die Konvergenz zwischen Messung und Simulation hat sich im optimierten Testaufbau deutlich verbessert und deutet auf weniger Störungen durch einen hochfrequenzgerechteren Aufbau hin.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die ersten Schritte zur Realisierung einer effektiven Einkopplung von Mikrowellen in den Fangdraht eines „kalten Atom“ Experiments getan. Dafür wurde das ausgearbeitete Testdesign auf einer Prototypenplatine realisiert. Zur Verifizierung der Ergebnisse ist eine Finite Elemente Simulation durch die Software Comsol aufgesetzt worden. Als Ergebnis erhält man die S-Parameter der Platinen Ports, sowie die Verteilung des E- und H-Feldes auf dem gesamten Board. Das Ergebnis der S-Parameter Messung zeigt die erfolgreiche Dämpfung der HF-Welle bei der DC-Quelle. Die E- und H-Feld Messung bringt Aufschluss über die Position deren Maxima und Minima. Das Resultat der Vermessung der optimierten Testplatine ergibt eine bessere Konvergenz zwischen Simulation und Messung, sowie eine verbesserte Übertragung des HF-Signals auf die Fangstrecke.
Für weitere Iterationen der Testplatine empfiehlt sich im Aufbau, der Messung und der Simulation Verbesserungen durchzuführen. Der Loss Tangent von FR-4 macht das Material nicht geeignet für Frequenzen über 2 GHz. Für weitere Schritte sollte auf ein hochfrequenzfähiges Material, wie ein Rogers Material gewechselt werden. Um die Abstrahlung im Bereich über der Fangstrecke zu erhöhen, sollte dort der Coverlayer weggelassen werden. Dieser verursacht weitere Verluste und kann durch eine ENIG-Beschichtung, welche nicht korrodiert, eine bessere Oberflächenrauigkeit und Materialeigenschaften besitzt, ersetzt werden. Um reproduzierbare Messergebnisse der E- und H-Feld Messungen, unter Ausschluss der Einflussfaktoren der Umgebung zu erlangen, könnte ein präziser Messaufbau entwickelt werden. Dieser besitzt als Grundvoraussetzung einen Antrieb, der das Messergebnis nicht beeinflusst, jedoch die Wiederhol- und Positioniergenauigkeit deutlich verbessern soll. Des Weiteren ist für präzisere Messungen eine Messbox unverzichtbar, um Umgebungseinflüsse, wie Strahlungen oder sich verändernde Umgebungskapazitäten aus der Messung auszuschließen. Da die Möglichkeit des Aliasing durch das Übersehen der Minima und Maxima des Messtechnikers besteht, ist eine zeitlich angepasste Aufzeichnung des E- und H-Feldes über den Weg mit ausreichender Abtastrate notwendig. Nur dann kann ein Verlauf der Felder dargestellt und in weiterer Folge die Amplitude dieser zur Auswertung des Verhaltes herangezogen werden. Um die Konvergenz zwischen Messung und Simulation zu erhöhen, empfiehlt es sich weitere materialbezogenen Parameter in die Simulation mit einzubeziehen. Diese parasitären Effekte dominieren bei dem angestrebten hochfrequenten Signal die Übertragungseigenschaften.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[Altium Designer] Altium Designer – PCB-Design-Software, 2024, *Available from:* https://www.altium.com/de/altium-designer Accessed: 2024-08-13

[Böhi 2009] P. Böhi, M. F. Riedel, J. Hoffrogge, J. Reichel, T. W. Hänsch, und P. Treutlein, *2009.* Coherent manipulation of Bose–Einstein condensates with state-dependent microwave potentials on an atom chip*, natural physics,* No. 5, (Juli 2009), S. 592–597, DOI: 10.1038/NPHYS1329

[Moser 2020] M. Moser, 2020. *Das Altium Designer Leiterplatten Kochbuch*, Moser Michael, 300051919X, Ottersheim

[Nilsson 2013] B. Nilsson, 2013, Introduction to COMSOL Multiphysics, *Available from:* https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf *Accessed:* 2024-07-13

[Pozar 2005] D. M. Pozar, 2005. *Microwave engineering-3d ed.,* John Wiley & Sons, Inc., 978-0-471-44878-5, Hoboken

[Schinkovits 2023] F. Schinkovits, 2023. *Design of tunable microwave source for integrated quantum technology*, Wiener Neustadt

[Stiny 2019] L. Stiny, 2019. *Passive elektronische Bauelemente,* Springer Vieweg, 978-3-658-24732-4, Haag a. d. Amper

AUTOR



Alexander Anderle BSc.

FHWN, Johannes-Gutenberg-Straße 3, 2700 Wiener Neustadt, +43/5/0421 1222, anderle@fhwn.ac.at

HTBLuV Mödling – Abteilung Mechatronik | Präzisionstechnik | Matura + Reife- & Diplomprüfung (2012-2017)
Fachhochschule Wiener Neustadt – Bachelor-Studiengang Mechatronik | Mikrosystemtechnik (2018-2021),
Fachhochschule Wiener Neustadt – Master-Studiengang Mechatronik | Mechatronic Systems (2021-2024),
TriLite Technologies – Electrical Engineer (seit 2021)

ACOUSTIC OPTIMISATION OF A LASER BEAM SCANNER FOR AUGMENTED REALITY GLASSES

Lukas Bergmann, BSc.

Abstract: *Laser-Beam-Scanners (LBS) are a feasible solution to create augmented-reality (AR) glass displays and a crucial part of them is the MEMS-mirror, which scans a laser beam via an optical combiner across the user's eye. The mirror oscillates with certain frequencies and hence, radiates sound, which is characterised and attenuated in this work.*

First, the A-weighted sound-pressure-level (SPL) and its spatial distribution of the system was measured experimentally via multiple microphones. Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) measurements were also conducted, to evaluate the propagation of structural waves. To thoroughly characterize the acoustic behaviour of the LBS prototype, multiple setups were measured. One containing only the mirror for instance while another consisted of a dummy head with mockup glasses containing the LBS and a microphone in the ear to get as close to the human perception as possible.

Subsequently, multiple experiments were conducted to reduce the radiated sound, including the alteration of the device's housing and the use of foam as dampening material. Especially foam embeddings and coatings were successful in reducing the SPL.

Furthermore, the sound radiation was studied numerically using pressure-acoustics and solid-body-wave simulations, which provide hints to improve the housing geometry and determine appropriate materials. According to the simulations, the SPL can be reduced significantly by using modified housings. Additionally, a change of materials could reduce the amplitude of propagating structural waves.

Keywords: *Laser-Beam-Scanner, Augmented-Reality, MEMS, Acoustics, Simulation.*

1. INTRODUCTION AND PROBLEM FORMULATION

Augmented-Reality (AR) is a technology which overlays digital information, such as images or videos, onto the real world. AR-glasses use transparent displays, to project images to the user, without blocking out the environment. These glasses may be used casually, to display text messages or navigation apps for example, but also in the industry, to show instructions.

There are different ways to realise AR-glasses, for example using microdisplays based on Liquid-Crystal-on-Silicon (LCoS), micro light-emitting diodes (mLED), or organic light-emitting diodes (OLED) technologies. Another technology utilises laser-beam-scanners (LBS), which contain laser diodes and a micro-mirror. The working principle as illustrated in Fig. 1 includes the pulsing of lasers and the continuous scanning of at least one micro-mirror.

In this paper, the sound waves irradiated from the MEMS mirror are evaluated by experiments and simulations and various options for attenuation thereof are analysed.

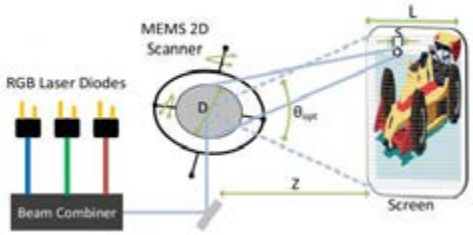


Fig. 1: Schematics of a Laser-Beam-Scanner. First, light is generated at the "RGB Laser Diodes", which is then aligned in the "Beam Combiner". Then, light is directed onto the "MEMS 2D Scanner" and finally scanned across the "Screen". [1]

2. MATERIAL AND METHODS

The measuring microphones (Type 4189 with 2671-pre-amplifiers from Brüel & Kjær) were calibrated using a sound-generator and afterwards the sound radiated by the mirror was recorded and processed using MATLAB. To accommodate for the human perception, an A-weighting was performed, and the resulting signal referenced to the smallest perceivable pressure at 1kHz, $p_0 = 20\ \mu Pa$. Thus the A-weighted sound-pressure-level (SPL) was obtained. [2] [3]

The acoustic measurement setup (Fig. 2) consisted of an insulated box to reduce ambient noise and reflections, foam-sheets to decouple the setup from external structural waves and multiple brackets to fix the LBS and the microphones.

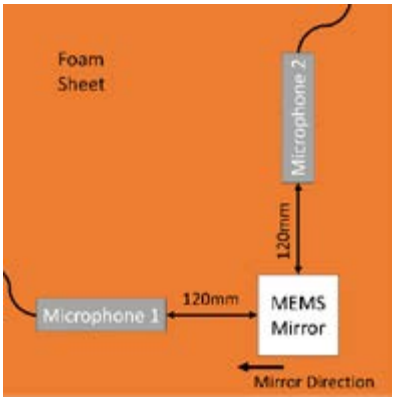


Fig. 2: Measurement setup. At the bottom right is the mirror. The two measurement microphones are placed at a distance of 120mm in front and at the side of the mirror.

The 120mm between the microphones and the mirror match the distance between the ear and the mirror in the AR-

glasses. The wavelengths of typical mirror frequencies are short enough, so that near-field effects can be neglected. [4]

Following the initial measurements, experiments using foam sheets and alternative housing geometry were conducted, to test their impact on the SPL. Since experiments required great time and effort, simulations were conducted using the COMSOL Pressure Acoustics package to estimate the radiation behaviour of different housings.

Additionally, to the measurements of the air pressure, the velocity of surface waves was measured using a Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) to analyse the propagation of structural waves. Furthermore, simulations were conducted using the COMSOL Structural Mechanics module with different materials and adhesives to deduce their impact on the reduction of the structural wave's amplitude.

3. MEASUREMENT OF ACOUSTIC PROPERTIES

Measurements with the mirror turned off showed peaks in the frequency-domain which are radiated by multiple fans of electrical devices. This interfering noise could be filtered by introducing a high-pass filter during the measurements of the mirror generated sound.

The frequency of the pure-tone sound radiated by the mirror can be determined by conducting a Fourier-analysis, whereby also harmonics of higher order appear in the spectrum. After applying a band-pass filter, the A-weighted SPL resulted in the same value, leading to the conclusion that the harmonics can be neglected.

The surface velocity for multiple setups has been measured, using the LDV. From the measured velocity-time series, the accelerations and displacement can be obtained by proper differentiation/integration. An attenuation of the velocity amplitude with increasing distance to the source is clearly detected. Another finding is that the mirror induced waves propagate from the mirror, through the temple up to the ear of the dummy-head illustrated in Fig. 3. Although, due to their low amplitude their effect on humans can be neglected.

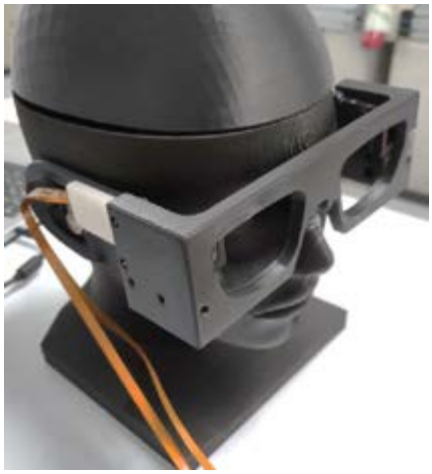


Fig. 3: Experimental setup for measuring the SPL in an AR glasses application.

4. MODIFICATION AND TESTING OF THE LBS

The first experiments included setups with a fabric coating, foam infill (inside the housing) and a foam coating (Fig. 4). The results show a strong SPL reduction for the third option, while the other two only slightly improved in reference to the unmodified setup.

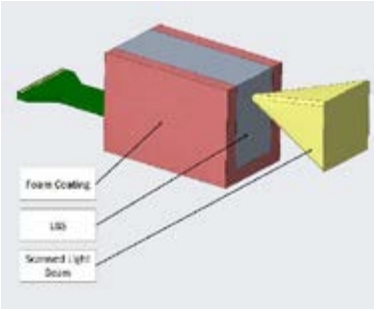


Fig. 4: Mockup LBS with foam coating at contact areas to the jig.

Another measurement includes a modified version of the housing, where a spring-like structure was added at the contact area to the glasses. Due to the high impact of the foam coating in previous measurements, this experiment also includes a foam coating together with the 3D-printed housing. To gather additional information about the spatial behaviour of the SPL, it was measured from eight different directions.

This experiment showed that the alternate housing reduces the SPL in the previously loudest direction but in general does not affect the SPL significantly. The partial foam coating however reaches substantial attenuations in all measurement directions.

The simulation regarding the SPL for different housing geometry also yielded significant sound reductions, especially for a setup including fins (Fig. 5).

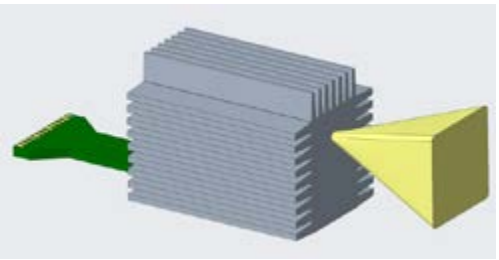


Fig. 5: Mockup LBS to demonstrate the application of fins.

Finally, simulations regarding the influence of material changes on the propagation of structural waves were performed. The materials that were simulated included aluminium, steel, and magnesium alloys for instance. Also, polymers, like polycarbonate, polyvinyl chloride or different epoxies were considered.

Amongst many results, setups where steel was applied achieved the lowest results for the structural wave's amplitude, although combinations of steel, aluminium and epoxies resulted in the best SPL reduction to weight ratio.

5. CONCLUSION AND FURTHER STEPS

Current MEMS-mirror prototypes used in laser-beam-scanners for AR glasses create single-frequency noises. The goal of the paper is to characterise the soundwaves, radiated from the mirror and to evaluate options for their attenuation.

For the characterisation, various measurements are conducted using microphones and an LDV. To prepare for the measurements, the microphones are gauged using a sound generator and a measurement setup including a sound-proof box has been developed. Subsequently, microphone measurements are conducted at a distance of 120mm to avoid near-field effects.

The LDV could detect structural waves propagating from the mirror to the ear of the user, although they are negligible due to their low amplitude.

With the sound properties well known, tests using a modified housing and the application of foam are performed. While the adapted housing does not change the SPL significantly, the partial foam coating is an effective modification, yielding high reductions of the SPL.

In addition to the experiments, pressure-acoustic and solid-body-wave simulations are conducted. Pressure-acoustics simulations are focused on the geometrical optimisation of the housing, resulting in considerable SPL reductions.

The solid-body-wave simulations provide information about the influence of different materials used in the LBS and which would be better suited to reduce the amplitude of structural displacements. This simulation yielded a combination of steel, aluminium and epoxy which can reduce the amplitude of structural waves and reduce the weight of the LBS compared to the currently used materials.

Further steps should include the experimental validation of the simulations and the simulation of porous media, to maximise the dampening effect of foams. Additionally, space-efficient geometrical improvements shall be investigated for the housing, as well as the interior design of the LBS. Lastly, the effect of the structural waves propagating to the user is to be tested on their effect on humans and either proven negligible or further attenuated.

7. BIBILIOGRPHY

[1] H. Urey, S. Holstrom and U. Baran, “MEMS laser scanners: a review,” *Journal of Microelectromechanical Systems,* p. 259, 04 2014.

[2] Ansys, “How A-weighting reflects what we hear,” [Online]. Available: https://www.ansys.com/blog/what-is-a-weighting. [Accessed 30 07 2023].

[3] G. Prof. Dr. Mueller and M. Prof. Dr. Möser, Handbook of Engineering Acoustics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

[4] M. Prof. Dr.-Ing. Möser, Technische Akustik, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009.

[5] J. Xiong, E. Hsiang and Z. He, “Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives,” *Light Science & Applications,* no. 216, 2021.

AUTHOR



Lukas Bergmann, BSc.

FH Wiener Neustadt, Johannes-Gutenberg-Straße 3, lukas.bergmann20@gmail.com

2018-2021: Bachelor in Mechatronics with focus on Micro- and Nanotechnology
2021-2023: Master in Mechatronics with focus on Additive Manufacturing

BESTIMMUNG DER MODALEN PARAMETER EINES ZWEISCHEIBENTRIBOMETERS FÜR DIE ENTWICKLUNG EINES DIGITALEN PROTOTYPS

Andreas Biederbeck, BSc.

Kurzfassung: *Tribometer werden zur Untersuchung von Reibungs- und Verschleißeigenschaften eingesetzt, sie spielen aber auch bei modernen Technologien, wie der Nutzung von Wasserstoff als alternativer Energieträger eine wichtige Rolle. Bei solchen Untersuchungen und Versuchen treten durch die Relativbewegungen dynamische Effekte auf, welche die tribologischen Ergebnisse beeinflussen können. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, müssen die dynamischen Parameter der Prüfstände bekannt sein bzw. experimentell ermittelt werden. Diese dienen zur Beschreibung der Eigendynamik, die in Experimenten mit modernen Messsystemen erfasst wird. Zeil dieser Arbeit ist, die modalen Parameter eines Zweischeiben-Tribometers durch experimentelle modale Analyse zu identifizieren und damit eine optimale Basis für die Entwicklung eines digitalen Zwillings des Prüfstandes zu schaffen.*

Schlüsselwörter: *Laservibrometer, Modale Analyse, Schwingungsanalyse, Maschinendynamik, Digitaler Zwilling*

1. EINLEITUNG

Auch wenn die fortschreitende Digitalisierung in vielen Bereichen des täglichen Lebens etabliert ist, stellt das klassische Papier nach wie vor einen festen Bestandteil dar. Für die Papierindustrie sind bei der Herstellung von Papier sogenannte Kalander, d.h. in einem Raster angeordnete Rollen von Bedeutung. Der Kalander Prozess ist für die Endqualität von Zellstoff und Papier von entscheidender Bedeutung. Unter Kalandrieren von Papier versteht man die kontrollierte Verformung des Zellstoffes unter Druck und Temperatur. Ein allgemeines Konzept solcher Maschinen ist in Abb. 1 dargestellt. Je nach gewünschter Papierqualität werden die „weichen" Rollen auch Nipformingwalzen genannt auf die Oberfläche der Papierbahn geprägt [Epton 1981, Parker 1975].

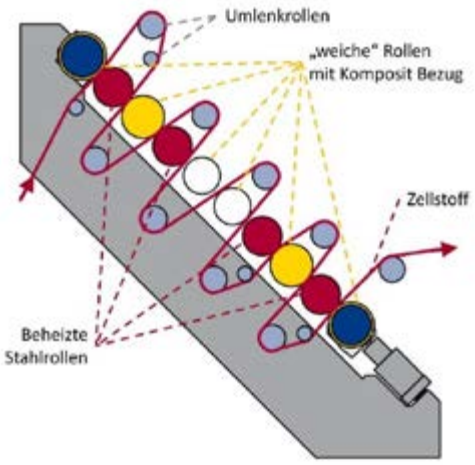


Abb. 1: Schematische Darstellung eines typischen Schrägkalanders zum Kalandrieren von Papier [Kohnen 2009], bearbeitet

Aufgrund der vorherrschenden Bedingungen des Kalander Prozesses, entsteht ein dynamisches Problem, das so genannte "Barring", bei dem durch plastische Verformung und Abrieb der weichen Nipforming-Walzen die zylindrische Form der Walzen verloren geht. Es tritt in Umfangsrichtung ein polygonartiges Muster auf, wobei die Polygonisierung der weichen Walzen zu mehreren Problemen führt. Kritisch ist der ungewollte Papierverschleiß durch den Abdruck des Musters auf das Papier. Aufgrund der unterschiedlichen Walzenmaterialien, sind auch die Reibungseigenschaften auf der Ober- und Unterseite des Papiers unterschiedlich. Dies führt zu selbsterregten Schwingungen der elastisch gelagerten Walzen respektive des Kalanders, die das Barring zusätzlich verstärken, woraus kürzere Wartungsintervalle folgen.

Um diese komplexen, selbsterregten Phänomene besser zu verstehen, ist es notwendig, das dynamische Verhalten einer Kalendermaschine zu kennen. Dabei werden vor allem Schwingungsanalysen und modale Analysen eingesetzt [Niemann 2009]. Erste Studien der Ursachen von Kalander-Barring und mögliche Abhilfemaßnahmen wurden in den 1960er und 1970er Jahren von Epton und Parker durchgeführt [Epton 1981, Parker 1975]. Shelly et. al. und Hader bestätigten die grundlegenden Behauptungen und untermauerten die Idee der gegenseitigen Beeinflussung von Papier- und Walzenunregelmäßigkeiten oder Konturfehlern. Weiters sind Studien in den Vordergrund gerückt, die eine valide Modellierung durch geeignete Simulationsmodelle in Form von digitalen Zwillingen etablieren. Weit verbreitet sind Tribometerprüfstände, die den Kalander Prozess möglichst gut abbilden, siehe Abb. 2 [Shelley2002, Hader 2005]. Zur Entwicklung eines „digitalen Zwillings" werden modernste Simulationsmodelle und High-End-Messsysteme verwendet. Die Systemparameter des digitalen Zwillings werden durch die Messdaten der Sensoren an dessen realem Gegenpart kontinuierlich aktualisiert, wodurch eine optimale Anpassung an den momentanen Zustand des Systems gewährleistet wird. Diese Methode findet in der Zustandsüberwachung, beispielsweise zur Überwachung des Verschleißzustandes einer Maschine und zur Vorhersage von dessen Entwicklung Anwendung. Mithilfe künstlicher Intelligenz erfolgt eine optimale Nutzung digitaler Zwillinge für "Predictive-Maintenance"-Prozesse [Muttillo 2019].

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist, die Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Zweischeibentribometer, im Besonderen einiger Teilkomponenten dieses Prüfstandes, siehe Abb. 2. Vor der Analyse von Tribometer Komponenten, werden grundlegende Versuche mit Mess- und Analyse Software sowie Parameteridentifikationsmethoden an Bauteilen wie Platten und Blechen aus verschiedenen Materialien durchgeführt. Ziel dieser Masterarbeit ist es, einen Workflow für die modale Analyse solcher Maschinen zu entwickeln und modernste Messgeräte- und Analysesoftwaren für die Erstellung von präzisen dynamischen Ersatzmodellen einzusetzen. Zu diesem

Zweck werden Versuche und Tests mit einem automatischen Modalhammer durchgeführt, um das Übertragungsverhalten von Komponenten des Tribometers zu erhalten. Modale Analysen werden im Anschluss durchgeführt um dynamische Parameter wie Steifigkeiten, effektive Massen und Dämpfungen sowie Eigenfrequenzen und Eigenschwingformen zu bestimmen. Die identifizierten Parameter dienen in weiterer Folge als Basis zur Modellierung eines digitalen Zwillings des Zweischeibentribometers.



Abb. 2: Zu analysierender Zweischeibentribometer als Labormodell eines Kalanders der Firma AC²T

3. METHODEN

Die Dynamik von Kalandern wird schon einige Jahrzehnte untersucht. Vorangegangene aber auch die durchgeführte Arbeit beschäftigen sich mit der Bestimmung der maßgebenden Parameter. Es werden modale Tests und Analysen für die richtige Einschätzung des dynamischen Verhaltens des untersuchten Zweischeibentribometers verwendet. Dazu wird klassische „experimentelle modale Analyse“ (EMA) verwendet. EMA nutzt bekannte oder speziell erzeugte Anregungskräfte und die daraus resultierenden Verschiebungen, um das dynamische Verhalten zu analysieren. Zur Durchführung einer modalen Analyse werden zunächst Rohdaten erfasst und Übertragungsfunktionen berechnet. Anschließend werden Methoden der allgemeineren Systemidentifikation eingesetzt, um die modalen Parameter eines untersuchten Modells zu bestimmen. In der Vergangenheit wurden verschiedene Identifizierungsmethoden für unterschiedliche Test- und Datenaufbauten entwickelt, die alle individuellen Vor- und Nachteile zeigen. Eine erste Unterteilung dieser Methoden ist die Domäne - Zeit oder Frequenz - in dem diese Algorithmen angewendet werden. Jedoch sind auch Unterscheidungen nach der verarbeiteten Datengröße, global bzw. lokal wirkend und der Systembeschreibung möglich.

Für die modalen Tests und die Datenerfassung werden unter anderem Modalhämmer, Beschleunigungs-sensoren und modernste 1D und 3D Scanning-Laser-Doppler-Vibrometer (VibroGo und Polytec 3D Scanning Laser Vibrometer PSV-3D-LDV QTec-600) eingesetzt. Zur automatischen Signal Erfassung kommt dabei der automatischen Modalhammer SAM 1 (NV-Tech) zusammen scannenden 3D-LDV PSV-3D-600 zum Einsatz.

LDV basieren auf dem Funktionsprinzip des Dopplereffekts. Dadurch können sie die Oberflächengeschwindigkeit aufgrund der Frequenz-verschiebung zwischen dem einfallenden und dem zum Messsystem zurückkehrenden Licht direkt und hochpräzise messen. Analog zu einem dreiachsigen Beschleunigungsaufnehmer ist es möglich, mit mehreren LDV auch dreidimensionale Auslenkungen zu messen, wozu eine Anordnung von drei Scanning-LDV notwendig ist. Wenn die Aus- und Einrichtung dieses Systems richtig vorgenommen wird, zeigen LDVs sehr ähnliche Daten wie herkömmliche Beschleunigungsmesser. Ein direkter Vergleich ist in Abb. 3 zu sehen, wobei das 3D-Scanning-LDV und der Beschleunigungssensor an der gleichen Position auf einer Aluminiumplatte positioniert sind, siehe auch [Ewins 2000].

LDV haben den Vorteil, dass sie durch den berührungslosen Messprozess nicht physisch mit der Struktur verbunden werden müssen und somit keinen Einfluss auf das dynamische Systemverhalten haben können [Dank 2016]. Nachteilig ist allerdings, dass eine Bildverarbeitung erforderlich ist, um eine dreidimensionale Vollfeldmessung der Struktur in erforderliche modale Testdaten umzuwandeln. Durch die Scanning-Funktion von LDVs ist es möglich, relativ schnell viele Daten von großen Strukturen zu erfassen und auch große Konstruktionen mit einer hohen Dichte an Messpunkten zu untersuchen [Dank 2018].

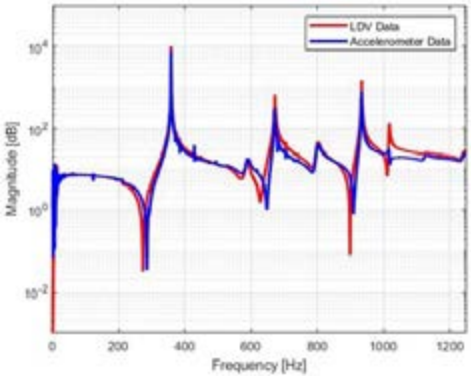


Abb. 3: Vergleich der Übertragungsfunktionen, auch FRFs genannt unter Verwendung des PSV-3D-LDV und herkömmlichen Daten aufgenommen eines Beschleunigungssensors [Ewins 2000]

Zusammen mit dem Polytec Front-End als Signalverarbeitungsstation und der modalen Analysesoftware PolyWave wird der Analysepfad für jene Auswertung komplementiert. Auf Basis dieser Messungen und kombiniert mit der AbraVibe Toolbox als GUI in MATLAB wird der zweite Teil des Ergebnisvergleichs erstellt. Als dritter Teil für die Untersuchungen dienen Finite Elemente Analysen einfacher ebener Strukturen, die vor den eigentlichen Tribometer-Experimenten untersucht werden, um FEM-Analysen mit den experimentell ermittelten modalen Ergebnissen zu vergleichen.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISDARSTELLUNG

Um sich mit dem komplexen Messgerät vertraut zu machen, werden zunächst einfache Strukturen analysiert. Ein Aluminiumrahmen dient als Basis für die freie Aufhängung der ebenen Strukturen (Platten). Für die Befestigung werden elastische Bänder verwendet. Um eine Validierung der Daten vorzunehmen ist auf den Platten zusätzlich ein Piezo-

Elektrischer Beschleunigungsmesser appliziert. Als Alternative zu solchen herkömmlichen Beschleunigungs-messern werden bei modalen Tests häufig LDV eingesetzt. Jede der vier untersuchten Platten ist mit einer Halterung für einen Beschleunigungsaufnehmer HBK 4507 ausgestattet, um eine schnelle Validierung der LDV-Daten bereits bei der Messung vorzunehmen. Die weitere Analyse erfolgt in den beiden Analysetools PolyWave und Abravibe. Letztlich erfolgt ein Vergleich mit den Ergebnissen einer numerischen modalen Analyse in Ansys. Dies ist besonders wichtig, wenn im weiteren Simulationsmodelle z.B. ein digitaler Zwilling, optimiert und abgeglichen werden müssen.

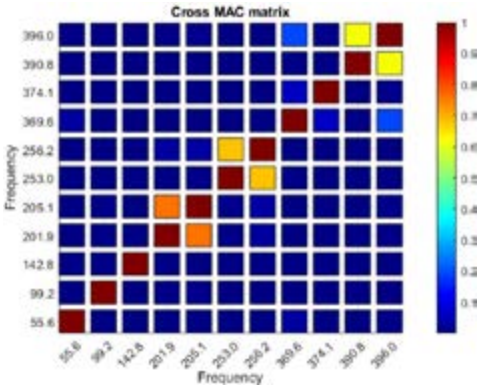


Abb. 4: Cross-MAC-Matrix einer modalen Analyse als Vergleich zwischen den experimentell ermittelnden modalen Moden

Zum Vergleich zwischen den Experimenten und den numerischen Modellen dienen MAC-Matrizen, welche die „Ähnlichkeiten" von modalen Ergebnissen beschreiben [Ewins 2000]. Eine sogenanntes Cross-MAC-Kriterium ist in Abb. 4 dargestellt. Dies ist ein abgeleitetes Kriterium zum Vergleich der Moden und können auch zur Detektion von symmetrischen Moden genutzt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse der modalen Tests werden direkt zur Untersuchung des in Abb. 2 abgebildeten Prüfstandes übernommen.

Der Zweischeibentribometer wird für die weiteren Untersuchungen in drei Messbereiche „links", „rechts" und „mitte" aufgeteilt, weil die Versuchszelle begrenzt ist und der geringe Abstand vom Messgerät zum Prüfstand mehrere Messpositionen erfordert. Um die unterschiedlichen Schwingungsformen besser zu detektieren wird der Prüfstand aus zwei Richtungen, von „vorne" und von „oben" vermessen. Die dabei verwendeten Messgitter sind in Abb. 5 gezeigt. Die erste Messrichtung ist von „vorne", um vertikale und horizontale Bewegungen der Teile und Komponenten zu erfassen. Ein zweiter Messaufbau ist von „oben" geplant. Hier geht es vor allem darum, Bewegungen der Teile in deren Ebenen Ausbreitung besser zu erkennen. Für die Tests sind insgesamt neun Anregungspunkte für den Prüfstand gewählt. Bei der Wahl wird eine räumliche Nähe zum tatsächlichen Anregungspunkt, dem Kontakt des Scheibenpaares berücksichtigt.

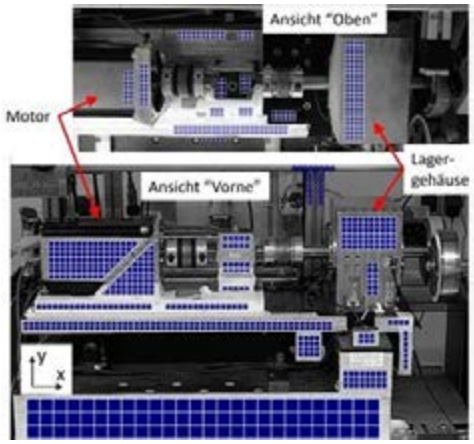


Abb. 5: Messpunkte des PSV-3D-LDV am Zweischeiben-Tribometer von „Oben" und von „Vorne"

Für weitere Analysen werden die Messungen in einem „Kontakt"- und einem „Nicht-Kontakt"-Szenario durchgeführt. Für das Kontaktszenario wird eine Stahlscheibe auf der festen Seite und eine „weiche" Stahlscheibe mit Verbundwerkstoff als Bezug auf der beweglichen Seite montiert. Die Rollen werden mit einer Kraft von 800N zusammengedrückt. Im „Nicht-Kontakt" Fall wird der bewegliche Tisch gegen eine undefinierte Verschiebung durch eine Schraube gesichert Die Schraube ist zusätzlich mit 300N vorgespannt. Diese Herangehensweise hilft im Weiteren bei der Abstimmung des digitalen Zwillings, weil ein komplexes Kontaktmodell zwischen dem Scheibenpaar im ersten Schritt vermieden werden kann.

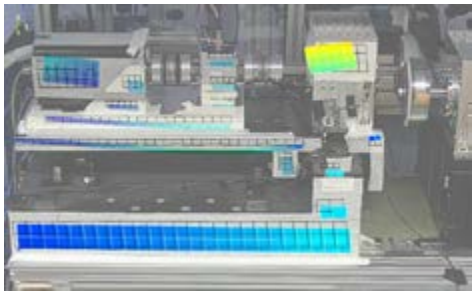


Abb. 6: Biegemode des Prüfstandes bei 138Hz Die unsymmetrische Deformation entsteht durch die ungleiche Massenverteilung

Die modalen Tests werden mit dem PSV-3D-600 aufgezeichnet. Für die Messungen im Frequenzbereich mit dem LDV wird die Einstellung „komplexe Mittelwertbildung" gewählt, siehe [Polytec PSV Theory, Kapitel 6]. Bei den im Zeitmodus durchgeführten Messungen werden drei Schläge pro Punkt aufgezeichnet, die später in der AbraVibe-Signalverarbeitung gemittelt werden. Beispielhaft sind in Abb. 6, 7 und 8 Ergebnisse der modalen Analyse der durchgeführten Messungen abgebildet. Die Messdaten des VPSV-3D-600 werden für die Analyse in AbraVibe entweder als Zeitserien eingelesen oder direkt als Übertragungsfunktionen, als Ergebnis der LDV-Messungen im Frequenz-Modus.

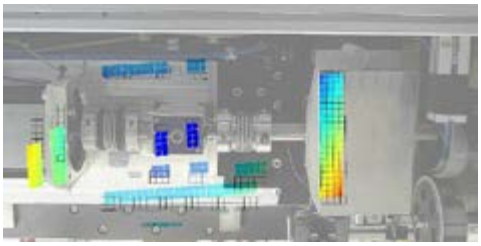


Abb. 7: Torsionsmode bei 144Hz, deutlich zeigen sich gegenphasige Bewegungen der Komponenten des Prüfstandes

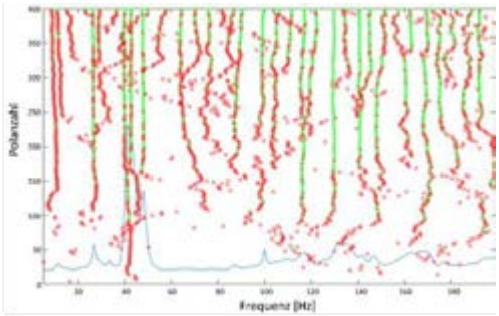


Abb. 8: Typisches Stabilitätsdiagramm der Analyse in AbraVibe für die aufgenommenen Daten des LDV, Grüne Plus im Diagramm ergeben stabile Polpaare

Abb. 6 und 7 zeigen die modalen Schwingformen bei jener gefundenen Eigenfrequenz. Dazu werden typische Stabilitätsdiagramm erzeugt, siehe Abb. 8. Die stabilen Pole enthalten die gesuchten modalen Parameter des Systems, die im Weiteren zur Entwicklung des digitalen Zwillings dienen.

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die experimentelle modale Analyse liefert fundamentale Einblicke in die Schwingungseigenschaften des untersuchten Prüfstandes und sein Verhalten und deren Einfluss auf tribologische Ergebnisse. Vor allem die Analyse der Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Eigenschwingformen liefert die Basis zur weiteren Erstellung des digitalen Zwillings. Die gewonnenen Kenntnisse über das Messsystems und der verwendeten modalen Analyse-Werkzeuge werden direkt bei der Extraktion der modalen Parameter umgesetzt. Die modale Test- und Analysekampagne hat gezeigt, dass modale Versuche in einer Vorbereitungsphase genau geplant werden müssen. Vor allem ist ein hohes Maß an Genauigkeit bei der Durchführung solcher Tests erforderlich. Geringfügige Modifikationen des Systems oder Abweichungen, beispielsweise hinsichtlich der Ausrichtung des Hammers oder der Einstellung des LDV, können zu signifikanten Änderungen der Ergebnisse führen.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des COMET-Zentrums InTribology (FFG-Nr. 906860) und des „Collective Research“ (FFG-Nr. 904017), in Projekten des „Kompetenzzentrums für Tribologie“ (AC2T research GmbH), durchgeführt. InTribology wird durch das COMET – Competence Centers for Excellent Technologies Programm von den Bundesministerien BMK und BMAW als auch den Bundesländern Niederösterreich und Vorarlberg auf Basis der finanziellen Unterstützung durch die beteiligten Projektpartner gefördert. COMET wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt.

LITERATURVERZEICHNIS

Dank, J. 2016, Ohne Massebeladung Wirkung und Kompensation in der Schwingungsanalyse – Applikationsnotiz, *Polytec Magazine*

Dank, J. 2018, Hohe Punktdichte optisch das wahre Schwingungsverhalten Messen – Applikationsnotiz, *Polytec Magazine*

Epton, J. B. A. und Parker, J. R., 1981, Glättwerk-Barring und Nasspressenvibration. *Wochenblatt Für Papierfabrikation*

Ewins, D.J., 2000 Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press LTD., 2nd ed.*

Hader P., 2005, Berichte aus der Mechanik - Selbsterregte Schwingungen von Papierkalandern, *Universität Duisburg-Essen*

Kohnen, J., 2009 FlexiNip Konzept im Janus MK2 Kalander erhöht Flexibilität. *twogehter Magazin für Papiertechnik Vol. 29*

Muttillo et. al., 2019 Structural health continuous monitoring of buildings – A modal parameters identification system*, 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies*

Niemann J., 2009 Papiermacher werden aktiv, Kalanderwalzen-Barring, Flexibilität. *twogehter Magazin für Papiertechnik Vol. 28*

Parker, J. R., und Epton, J. B. A., 1975, Analyse und Kontrolle von Kalanderschwingungen, *Pulp and Paper Canada*

Polytec, Polytec Scanning Vibrometer - PSV Theory*, as of software 9.1 ed.*

Shelley S.J., Zwart J. und Fournier A., 2002, New Insights into Calender Barring Prevention, *83rd Annual Meeting, Technical Section*

AUTOR



Andreas Biederbeck, BSc

AC²T research GmbH Österreichisches Kompetenzzentrum für Tribologie, Viktor-Kaplan-Straße 2/C, 2700 Wiener Neustadt, Österreich, +43 (0) 2622 81600-0, office@ac2t.at

HTBLA-Matura 2020, Bachelor-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik“ 2020 bis 2022 sowie Master-Studium „Mechatronik“ an der FH Wiener Neustadt seit 2022, “Design and Production Engineer” bei Skytec Aerospace 10.2021-01.2024, Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei AC²T seit 02.2024

AUTOMATISIERTE FEHLERDETEKTION BEI ABGASTURBOLADERN

Mert Bingöl, BSc.

Kurzfassung: *Die Masterarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Systems, das in der Lage ist, einen fehlerhaften Abgasturbolader durch eine systematische Vorgehensweise, zu detektieren. Die Arbeit wird in vier Hauptteilen gegliedert: Im ersten Teil wird das Messsystem entwickelt bei dem die Sensoren, welche im Versuchsfahrzeug vorhanden sind, mit dem Mikrocontroller über einen Spannungsteiler parallel zum Motorsteuergerät ausgelesen werden. Zusätzlich soll ein Abgasdrucksensor nachgerüstet werden, da dieser bei der Analyse eine wichtige Rolle spielt.*

Im zweiten Teil werden die Spannungswerte der Sensoren in die entsprechenden physikalischen Größen umgewandelt. Diese Umwandlung erfolgt im Mikrocontroller, sodass die Messdaten bereits in den richtigen Einheiten ausgegeben werden.

Im dritten Teil der Arbeit werden die Messdaten analysiert. Hierfür wird eine Software mit einer grafischen Benutzeroberfläche in Python entwickelt, die mehrere Funktionen erfüllt. Zu den Hauptfunktionen zählen die Aufzeichnung der Messdaten während einer Testfahrt sowie die eigentliche Analyse. Dabei werden die Messdaten mit einer Referenzmessung verglichen.

Im letzten Teil wird das System auf seine Funktionsfähigkeit geprüft. Unterschiedliche Fehlerarten am Abgasturbolader werden dafür simuliert und anschließend auf eine korrekte Fehlerdetektion geprüft.

Schlüsselwörter: *Abgasturbolader, Überwachungssystem, Datenerfassung, Datenanalyse*

1. EINLEITUNG

Mit den zunehmenden gesetzlichen Vorschriften an Emissionsreduktionen der heutigen Mobilität, aber auch beim Thema Downsizing, spielen Abgasturbolader eine wichtige Rolle. Mit einem Abgasturbolader wird die Leistung des Verbrennungsmotors erhöht, indem eine höhere Sauerstoffmenge in den Brennraum des Motors zugeführt wird. Neben der Leistungssteigerung wird gleichzeitig auch die Umweltbelastung reduziert, da ein aufgeladener Verbrennungsmotor im Vergleich zu einem Saugmotor, einen kleineren Hubraum, für dieselbe maximale Ausgangsleistung benötigt [Richard et al. 2014]. Ein fehlerhafter Abgasturbolader würde die Leistung des Motors, aber auch die Umweltbelastung negativ beeinflussen. Dabei muss der Fehler nicht immer sofort erkennbar sein, es gibt Fälle, wo der Schaden des Abgasturboladers nicht bemerkbar ist, aber die Umwelt dennoch mit übermäßigen Abgaswerten belastet wird [Golloch 2005].

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Systems, welches durch eine systematische Vorgehensweise, Fehler bei Abgasturboladern detektieren kann. Bisherige Systeme konzentrieren sich auf die Detektion von Leckagen in der Ladeluftstrecke oder den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Wert der Position des Ladedruckstellers.

Zu Beginn wird das Datenerfassungssystem entwickelt, in dem die Sensoren, die bereits im Versuchsfahrzeug vorhanden sind, mit dem Mikrocontroller verbunden werden. Dabei werden die Rohspannungswerte der Sensoren vom Mikrocontroller erfasst, in dem dann die Kalibration der Sensordaten in die physikalischen Größen erfolgt. Sensoren, die nicht im Fahrzeug vorhanden sind, werden nachgerüstet. Die Datenanalyse findet in einem Python-Skript statt. Die Messdaten werden über die serielle Schnittstelle an das Python-Skript übermittelt und durch eine Analyse der Messwerte werden, wenn vorhanden, Fehler eines Turboladers identifiziert. Als Referenz dient ein funktionaler Turbolader. Die Validierung des Systems wird durch eine Simulation der Fehlerarten am Abgasturbolader durchgeführt.

3. MATERIALIEN UND METHODEN

Für die Fehlerdetektion werden die Zusammenhänge zwischen mehreren Messdaten, die im Zusammenhang mit einem Abgasturbolader stehen, ermittelt und analysiert. Dazu zählen die Parameter wie Abgasdruck, Ladedruck, Ladelufttemperatur, Ansaugluftmasse, Position vom Ladedrucksteller, Motordrehzahl und Einspritzmenge. Die theoretischen Grundlagen für diese Arbeit bilden wissenschaftliche Artikel, Fachbücher, Herstellerangaben und Datenblätter. Zu den experimentellen Durchführungen zählt unter anderem die Installation der Sensoren zur Ermittlung der oben genannten Parameter, welche vor der Verarbeitung, in die richtige physikalische Größe umgewandelt werden müssen. Bei Sensoren, die bereits im Fahrzeug verbaut sind, werden die Signale anhand eines Spannungsteilers, parallel zum Motorsteuergerät, abgelesen. Für die Kalibrierung der Sensoren wird ein Diagnosegerät verwendet, wo die Messwerte bereits in der richtigen Einheit angezeigt werden. Die Messwerte wie die Motordrehzahl und der Einspritzmenge werden über die Ansteuerungszeit des Einspritzventils ermittelt. Beim Versuchsfahrzeug handelt es sich um ein Auto mit einem Common Rail Dieselmotor. Als Mikrocontroller wird ein ESP32 verwendet, welcher über die serielle Schnittstelle mit einem Python-Skript kommuniziert, wo die eigentliche Analyse stattfindet.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Die Arbeit besteht aus vier Hauptteilen: Datenerfassung, Datenverarbeitung, Datenanalyse und Fehlersimulation. Im ersten Teil werden die nachfolgenden Sensoren am Versuchsfahrzeug, über einen Spannungsteiler mit dem Mikrocontroller verbunden:

- Kraftstoffdrucksensor
- Ladedruck- und Ladelufttemperatursensor

- Luftmassenmesser
- Positionssensor für den Ladedrucksteller
- Abgasdrucksensor

Um die Motordrehzahl und die Einspritzmenge berechnen zu können, wird auch die Ansteuerzeit des Einspritzventils ermittelt. Die Motordrehzahl wird anhand einer Zeitmessung zwischen zwei Haupteinspritzungen berechnet und die Einspritzmenge durch die Messung der Ansteuerdauer für die Haupteinspritzung. Die nachfolgende Tabelle (Tab. 1) gibt einen Überblick über alle Messwerte, die für die Analyse benötigt werden.

Messgröße	Einheit	Messmethode
Motordrehzahl	min^{-1}	berechnet
Einspritzmenge	mg/Hub	berechnet
Ansteuerdauer	µs	digitalRead()
Kraftstoffdruck	Bar	analogRead()
Ladelufttemperatur	°C	analogRead()
Luftmasse	g/s	digitalRead ()
Ladedruck	mbar abs.	analogRead()
Abgasdruck	mbar abs.	analogRead()
Position Ladedruckteller	%	analogRead()

Tab. 1: Zusammenfassung der Messdaten

In Abbildung 1 ist die Anordnung der verwendeten Sensoren und Aktoren ersichtlich.

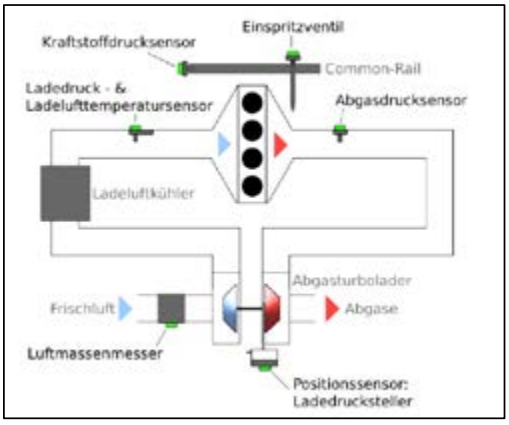


Abb. 1: Anordnung der Sensoren & Aktoren

Im zweiten Teil werden die Rohspannungswerte der Sensoren in die richtige physikalische Größe umgewandelt. Für die Umwandlung wird ein Diagnosegerät verwendet, wo die Messwerte bereits in der richtigen Einheit angezeigt werden. Durch einen manuellen Abgleich mit dem Diagnosegerät werden die Kennlinien der einzelnen Sensoren erstellt und diese dann im Mikrocontroller hinterlegt. Nach einer erfolgreichen Kalibrierung der Messdaten werden diese über die serielle Schnittstelle dem Python-Skript zur Verfügung gestellt.

Im dritten Teil erfolgt die Analyse der Daten im Python-Skript. Zu Beginn werden mit dem Versuchsfahrzeug mehrere Referenzfahrten durchgeführt. Während dieser Fahrten werden die Messwerte aufgezeichnet, die anschließend ausgewertet werden. Das Ziel ist es die Referenz für die Fehlerdetektion. Im Zuge der Arbeit wurden sechs Zusammenhänge identifiziert:

- Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und dem Verhältnis von Ladedruck zu Luftmasse
- Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und Luftmasse
- Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und dem Verhältnis von Abgasdruck zu Ladedruck
- Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und Ladedruckteller-Position
- Zusammenhang zwischen Motordrehzahl und dem Verhältnis von Abgasdruck zu Luftmasse
- Zusammenhang zwischen Luftmasse und Ladedruck

Um die Streuung in den Messwerten zu reduzieren, werden zwei Bedingungen implementiert, zu einem sind nur Datenpunkte berücksichtigt, bei denen die Einspritzmenge größer als 40 mg/Hub beträgt und zum anderen werden nur Testläufe verwendet, bei denen das Fahrzeug im dritten Gang die Messung aufgezeichnet hat. Im ersten und zweiten Gang würde ein Testlauf kurz dauern und deswegen keine auswertbare Messung stattfinden. Anhand dieser Bedingung werden nur Messungen im Volllastbereich in Betracht gezogen.

Um eine Verfälschung der Analyse durch das Turboloch zu vermeiden, werden die ersten 500 min^{-1} ab Beginn der Testfahrt von der Auswertung ignoriert. In Abbildung 2 ist exemplarisch eines der sechs Zusammenhänge dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein klarer Zusammenhang mit den Messwerten besteht. Die Ausreißer im unteren Drehzahlbereich sind während des Ladedruckaufbaus entstanden, die aber anhand der oben genannten Bedingung nicht berücksichtigt werden.

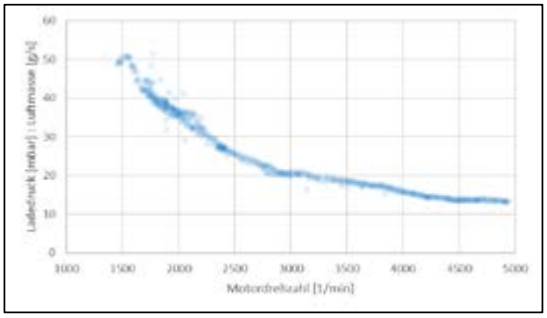


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Motordrehzahl, Ladedruck und Luftmasse

In dem Python-Skript werden aus diesen Zusammenhängen Lookup-Tabellen erstellt. Bei der Fehlerdetektion wird geprüft, ob die Messwerte über oder unter den Referenzwerten aus den Lookup-Tabellen liegen. Falls die Abweichung einen Schwellenwert von 5 % überschreitet, wird im Python-Skript eine Markierung für die betroffene Lookup-Tabelle gesetzt. Treten bei mehreren der sechs Lookup-Tabellen Abweichungen auf, entsteht durch die Kombination der gesetzten Markierungen ein einzigartiges Muster, mithilfe dessen sich folgende Fehlerarten identifizieren lassen:

- Verstopfte Abgasanlage

- Undichter Abgaskrümmer
- Mechanischer Fehler beim Ladedrucksteller
- Verstopfte Ladedruckstrecke

Das letzte Kapitel betrifft die Validierung der Arbeit. Dabei werden verschiedene Fehlerarten am Versuchsfahrzeug simuliert und anschließend durch die Analyse die Fehlerarten identifiziert.

5. ERGEBNISSE

Die Masterarbeit wurde durch eine Simulation der Fehlerarten validiert. Folgende Fehlerarten konnten erfolgreich simuliert und detektiert werden:

- Verstopfte Abgasanlage: Es wurden Aufzeichnungsfahrten mit einem voll beladenen Dieselpartikelfilter durchgeführt
- Verstopfte Ansaugung: Ein 3D-gedruckter Luftmengenbegrenzer (60 mm auf 10 mm) wurde in das Ansaugrohr befestigt, um die Ansaugluftmenge zu reduzieren
- Undichte Ladeluftstrecke: Ein Ladeluftschlauch wurde bewusst falsch montiert, um einen Teil der Ladeluft in die Umgebung auszulassen
- Undichter Abgaskrümmer: Mit einer Undichtigkeit im Rohr des Abgasrückführung-Kühlers konnte diese Fehlerart simuliert werden
- Mechanischer Fehler beim Ladedrucksteller: Befestigungsschrauben am Ladedrucksteller wurden für Testzwecke entfernt

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Durch eine systematische Vorgehensweise werden Fehler bei einem Abgasturbolader identifiziert. Für die Fehleridentifikation werden Sensorwerte ausgewertet, die direkt mit dem Abgasturbolader in Zusammenhang stehen. Das Messsystem basiert auf einem ESP32-Mikrocontroller, welcher über die serielle Schnittstelle mit einem Python-Skript kommuniziert. In dem Python-Skript erfolgt die Analyse der Messdaten, wobei diese mit Referenzdaten verglichen werden, um potenzielle Fehler des Abgasturboladers zu identifizieren. Das System wurde anhand der beschriebenen Fehlersimulationen validiert und die Zuverlässigkeit der Analyse nachgewiesen.

Die derzeitige Analyse beschränkt sich auf Volllastfahrten im dritten Gang. Eine Erweiterung der Lookup-Tabellen und der Algorithmen würde die Analyse auch im Teillastbereich (Einspritzmenge kleiner als 40 mg/Hub) und in den anderen Gängen ermöglichen. Darüber hinaus ist mit der jetzigen Implementierung eine Mehrfachfehlerdetektion nicht möglich. Eine Optimierung des Programms in diese Richtung würde eine Erkennung von mehreren gleichzeitig auftretenden Fehlern ermöglichen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

Golloch, R., 2005, *Downsizing bei Verbrennungsmotoren*. Springer-Verlag, ISBN: 9783540238836, Berlin

Richard, F., Rolf, G., Tobias, G., Heider, U., Hohmann, B., van Huet, A., Keil, W., Lohuis, R., Mann, J., Schlögl, B., Wimmer, A. & Wormer, G., 2014. *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik*, Verlag Europa Lehrmittel, ISBN: 9783808522400, Deutschland

AUTOR



Mert Bingöl, BSc.

bingoel.m1@gmail.com

HTL Wiener Neustadt Kolleg – erneuerbare Energie, Umwelt und Nachhaltigkeit 2018
FH Wiener Neustadt Bachelorstudium – Mechatronik & Mikrosystemtechnik 2022
FH Wiener Neustadt Masterstudium – Mechatronik 2025
Robert Bosch AG, Wien – als Entwicklungsingenieur seit April 2023

ENTWICKLUNG EINER TESTAUTOMATISIERUNG FÜR DSL-MODEMS VON TELEKOMMUNIKATIONSUNTERNEHMEN

Felix Führinger, MSc.

Kurzfassung: *Aufgrund des stetigen technologischen Wandels im Telekommunikationsbereich leisten zuverlässige DSL-Modems einen entscheidenden Beitrag um die Kundenzufriedenheit und Wettbewerbsfähigkeit von Telekommunikationsunternehmen sicherzustellen. Um die von Providern gegebenen Leistungsversprechen an Modems zu erfüllen, müssen diese regelmäßigen Tests unterzogen werden. In dieser Masterarbeit wird eine umfassende Testsuite für DSL-Modems entwickelt, deren Schwerpunkt auf der Automatisierung der Tests liegt. Es werden automatisierte Tests konzipiert, die eine standardisierte Überprüfung verschiedener Modemtypen ermöglichen. Durch den Einsatz der Testautomatisierung gelingt es, konsistente Tests durchzuführen und die Vielfalt an Modems effizient zu überprüfen. Die Auswahl der zu automatisierenden Tests erfolgt unter Berücksichtigung der technischen und funktionalen Spezifikationen der Modems. Das Hauptziel der Masterarbeit besteht in der Entwicklung automatisierter Testszenarien, die die Leistung von DSL-Modems gemäß festgelegten Anforderungen prüfen. Diese Testszenarien werden in einer spezialisierten Testautomatisierungsumgebung implementiert um eine reproduzierbare Testdurchführung zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Durch die Arbeit hat sich gezeigt, dass die Umsetzung einer Testautomatisierung gerade zu Beginn sehr hohe Investitionen an Zeit und Ressourcen erfordert, bevor die Automatisierung ihre vollen Vorteile bietet. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Testautomatisierung eine wichtige Komponente ist, um eine verbesserte Effizienz beim Testen zu erreichen. Es gibt jedoch auch Herausforderungen, insbesondere bei der Entwicklung und der Anpassung der Testcases an zukünftige Anforderungen.*

Schlüsselwörter: *DSL-Modems, Testautomatisierung, Modemanforderungen, Teststrategie*

1. EINLEITUNG

Um am Markt bestehen zu können bieten Telekommunikationsunternehmen eine Vielzahl an Produkten und Services für Business- und Residential-Kunden an. Entscheidet sich der Kunde für ein Internetprodukt, so wird ihm vom Provider ein DSL-Modem zur Verfügung gestellt. Das Modem ist das Endgerät mit dem der Kunde die Verbindung aus seinem Heimnetzwerk in Richtung Internet herstellt. Mit allen Geräten gehen vom Provider Leistungsversprechen an die Modems einher. Diese sollen einerseits die Kundenversprechen erfüllen und andererseits mit den Modellen der im Wettbewerb stehenden Provider mithalten können.

Da von Providern eine Vielzahl an DSL-Modems im Einsatz sind, steht die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit an oberster Stelle. Nur mit einem Produkt, das die Erwartungen der Kunden erfüllt, ist es für die Unternehmen möglich die Kundenzufriedenheit sicherzustellen und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten. Um dies zu erreichen ist es notwendig die DSL-Modems gründlichen Tests zu unterziehen.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Aufgrund der komplexen Modemlandschaft in Telekommunikationsunternehmen und der Vielzahl an Modellen im Feld, ist der Bedarf für eine Testautomatisierung immer weiter gestiegen. Die Telekom Austria bietet hier ein anschauliches Beispiel, da im Bereich der A1 etwa 15 verschiedene Modemtypen unterschiedlichster Hersteller im Einsatz sind. Diese Vielfalt an Modems, die unterschiedliche technische Spezifikationen aufweisen, müssen kontinuierlich und gründlich getestet werden. Da das manuelle Testen dieser Menge an Modellen zu kostenintensiv wäre, soll die Testautomatisierung hier Abhilfe schaffen. Die Herausforderung besteht darin, eine effiziente Testautomatisierung zu entwickeln, die eine gründliche Testung aller Geräte sicherstellt. Es müssten beispielsweise die 2,4G, 5G und zukünftig auch 6G Standards, die Hardwareschnittstellen wie LAN-Ports, die Firmware, die unterstützten Dienste und alle technischen Spezifikationen, die sich über Modellgenerationen hinweg weiterentwickeln können, getestet werden.

Zentraler Aspekt der Problemstellung ist auch, dass in der Telekom Austria neben den aktuellen Modellen auch ältere im Einsatz sind und dies sich aufgrund von wirtschaftlichem Interesse auf absehbare Zeit nicht ändern wird. Das bedeutet, dass auch diese Modelle regelmäßig softwareseitig upgedatet werden müssen. Damit einhergehend sind nach einem von der Herstellerfirma bereitgestellten Firmware-Update auch alle Funktionalitäten, sowie alle WLAN-Standards und Hardware-Schnittstellen gründlich zu testen, um sicherzustellen, dass das Gerät im Anschluss noch sicher und einwandfrei funktioniert. Durch die Testautomatisierung soll somit ein Standard geschaffen werden um die DSL-Modems auf ihre Funktionalitäten zu testen und so eine reibungslose Integration und optimale Leistung zu gewährleisten.

Zusammenfassen lassen sich die aufgezeigten Probleme mit der zentralen Fragestellung der Masterarbeit:

Welche Möglichkeit gibt es eine Testautomatisierung auf effiziente und zuverlässige Weise einzusetzen, um eine standardisierte Überprüfung verschiedener DSL-Modemtypen zu ermöglichen?

3. METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Die Informationsgrundlage der Arbeit bildet wissenschaftliche Primärliteratur, welche durch eine Literaturrecherche erhoben wurde. Um einen Überblick über die Thematik zu erlangen wurde mit der Recherche der Fachbegriffe „DSL-Modem testing“ oder der Beschreibung „testing automation“ sowie dem Begriff „software testing“ oder „testing strategy“ begonnen. Dabei wurden die Begriffe in der online Bibliothek der FH Wiener Neustadt gesucht. Diese nutzt WorldCat, welche die weltgrößte bibliografische Datenbank für wissenschaftliche Literatur ist. Die Quellen welche WorldCat zu Grunde liegen und welche auch vorwiegend für die Literaturrecherche der Arbeit herangezogen wurden, sind die

Datenbanken IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink und Elsevier. Die daraus entnommenen wissenschaftlichen Zeitschriften und Fachbücher bilden die Informationsgrundlage des Dokuments.

Durch die Literaturrecherche wurden die Grundlagen der Testautomatisierung ermittelt, die für die Testung von DSL-Modems relevant sein könnten. Das Ziel war es einerseits den Testbedarf bei DSL-Modems zu identifizieren und andererseits Ideen zu sammeln, wie bereits bestehende Teststrategien zur Überprüfung angewendet werden könnten. Anhand dieser Recherche wurde ermittelt, welche Anforderungen an Modems gestellt werden und wie diese getestet werden können. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Identifikation von Anforderungen gelegt, die für eine automatisierte Testdurchführung geeignet sind.

Der zweite Abschnitt der Arbeit wurde in Form einer Case Study durchgeführt, um die Entwicklung der Testautomatisierung umzusetzen. Anhand der durchgeführten Analyse der Modemanforderungen wurden in weiterer Folge Testcases entwickelt, die eingesetzt werden, um die Eigenschaften der DSL-Modems zu untersuchen. Auf diese Weise sollen die identifizierten, technischen und funktionalen Spezifikationen durch einen Testcase überprüft werden können. Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung der Testcases liegt auf der Automatisierungsfähigkeit der Testcases. Aus der Vielzahl an automatisierbaren Testcases wurde im Anschluss eine ganzheitliche Testsuite erstellt. Die Entwicklung und Implementierung der Testcases erfolgt in einer spezialisierten Testplattform. Da die Arbeit im Zusammenhang mit der Telekom Austria entstanden ist, wurde die dort verwendete ABS-Cloud als Testsystem genützt. Diese gewährleistet eine standardisierte und effiziente Testdurchführung und ermöglicht die Erstellung einer übergeordneten Testsuite die es ermöglicht, sämtliche im Einsatz befindlichen Modems automatisiert zu testen.

Im Anschluss an die Entwicklung der Testautomatisierung wurde diese auf den ausgewählten DSL-Modems ausgeführt. Dazu wurden durch die Testsuite alle in ihr implementierten Testcases ausgeführt. Als Ergebnis liefert die ABS-Testplattform einen detaillierten Report bei dem es im Anschluss wichtig war, die Ergebnisse auf Plausibilität zu prüfen. Insbesondere galt es im Zuge der Masterarbeit zu identifizieren, warum nicht alle fehlgeschlagenen Jobs auch tatsächlich auf soft- oder hardwareseitige Fehler der Modems zurückzuführen sind.

Zum Abschluss wurden die gewonnenen Erkenntnisse der durchgeführten Tests, die erzielten Ergebnisse, sowie mögliche Herausforderungen dokumentiert. Dabei sollten die aus der entwickelten Teststrategie erzielten Ergebnisse zusammengefasst und in der Masterarbeit festgehalten werden.

4. TESTUMGEBUNG UND INFRASTRUKTUR

Durch die Laborumgebung wird die physikalische Infrastruktur bereitgestellt, die für die Durchführung der Testautomatisierung erforderlich ist. Sie beinhaltet, alle für die Tests notwendigen Komponenten wie die Testheads, den ABS-Server, den Switch, die USB-Speichermedien, das analog Modem und die zu testenden CPEs und verbindet diese über das Labornetzwerk. Die Testheads, auch als Frontend bezeichnet sind leistungsfähige Mini-PCs, die sämtliche Schnittstellen bieten, die für eine umfassende Testung moderner Modems erforderlich sind. Als Testplattform wurde die ABS-Cloud gewählt die speziell für die Durchführung und Verwaltung von Testcases entwickelt wurde. Die ABS-Cloud ist eine mandantenfähige Plattform, die von mehreren Benutzern gleichzeitig verwendet werden kann.

Sowohl die Testheads als auch die Testplattform ABS-Cloud werden von der Firma BHRTech GmbH zugekauft. Die Firma BHR Tech ist ein 2013 gegründetes österreichisches Unternehmen, welches sich auf die Testautomatisierung von xDSL-Technologien für Hard- und Software im Bereich Telekommunikation spezialisiert hat. Die Entwicklung der Testcases erfolgt in der 2020 auf den Markt gebrachten „Acceptance Booster System 2.0“ kurz ABS 2.0, die speziell für das automatisierte Testen von Telekommunikationsgeräten entwickelt wurde.

4.1 Laborumgebung

Die Laborumgebung verbindet die für die Tests notwendigen Komponenten physikalisch über das Labornetzwerk. Der Übersichtsplan der Laborumgebung ist in Abbildung 1 dargestellt. In diesem Netzwerk wird der ABS-Server mit den Labor-PCs, einem Linux Server und den sechs ABS-Testheads verbunden. An die Testheads kann unterschiedliches Customer Premises Equipment (CPE) einzeln oder zugleich angeschlossen werden. In dieser Laborumgebung sollen Geräte getestet werden, die den Endkundenstandort mit technischem Equipment der Telekommunikationsprovider verbinden. Daher werden vor allem DSL-Modems, Mesh-Systeme oder Switches an die Testheads angeschlossen. Auch die Labor PCs befinden sich im Labornetzwerk, da durch sie die Ansteuerung des ABS-Servers und der Testheads erfolgt. Über einen gesicherten Citrix-Wartungszugang ist es möglich remote auf das Labornetz zuzugreifen. Für Software-Updates ist das Labornetzwerk auch über eine Firewall mit dem Internet verbunden.

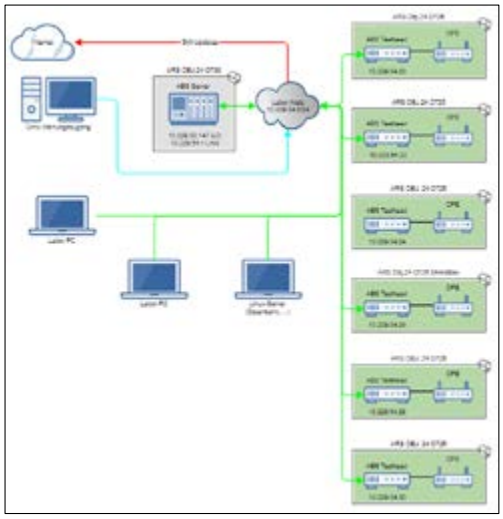


Abb. 1: Übersichtsplan Laborumgebung

4.2 Testheads

Der ABS-Testhead ist die Hardwarekomponente über die alle Tests ausgeführt werden. Er besteht aus leistungsstarken Hardwarekomponenten, die die erforderliche Leistung bereitstellen um Geräte gemäß ihren Spezifikationen testen zu können. Der Einsatz eines Testheads ist erforderlich, da er als physikalische Schnittstelle zum Modem fungiert und automatisierte Testungen ermöglicht die ohne umverkabeln der

Hardwarekomponenten ausgeführt werden können. Als Betriebssystem der Plattform und ebenfalls auch des Testheads wird Linux Ubuntu verwendet.

In Abbildungen 2 ist ein Testhead mit seinen Spezifikationen und Schnittstellen angeführt. Dieser hat 6x1Gbit Ethernet-Anschlüsse, wobei der erste für den Uplink auf die ABS-Cloud reserviert ist. Ebenfalls besitzt er 2xSFP+ (10Gbit Anschlüsse), 2x USB 3.0 Schnittstellen und ein WiFi 6e Modul, welches 3 Funkfrequenzen von 2,4 über 5 bis 6 GHz beinhaltet, jedoch gleichzeitig immer nur eine Frequenz nutzen kann. Die erforderliche Rechenleistung wird durch eine High-Speed CPU mit 32GB Arbeitsspeicher bereitgestellt, die eine hohe Leistungsfähigkeit auch bei umfangreichen Testsuiten sicherstellt.



Abb. 2: Testhead Spezifikationen

5. ENTWICKLUNG DER TESTAUTOMATISIERUNG

Ausgangspunkt bildete der aus der Literaturrecherche ermittelte Testbedarf bei DSL-Modems. Hierbei wurden die Hardware Anforderungen ermittelt die es zu testen gilt und die Dienste und Funktionen identifiziert die bei Modems überprüft werden sollen. Anhand dieser Anforderungen galt es zu ermitteln, wie eine Testautomatisierung für diese Punkte sinnvoll umsetzbar ist.

Der Fokus der Arbeit lag auf der Konzeption der Testsuite und der darin enthaltenen Testcases. Dazu wurden die Hard- und Software Anforderungen analysiert und eine umfassende Teststrategie erstellt. Bei der Entwicklung der Testautomatisierung wurde das Hauptaugenmerk auf die Überprüfung der vom Modem angebotenen Dienste und Services gelegt, da hier auch die verwendeten physikalischen Schnittstellen mitgetestet werden. Für die Testsuite wurden die nachfolgend beschriebenen Testcases entwickelt.

5.1 Interentdienst

Eine der wichtigsten Anforderungen an Modems ist die Bereitstellung von Internetdiensten. Da viele der Modemanforderungen mit einer aufrechten und stabilen Internetverbindung im Zusammenhang stehen ist es sinnvoll, zuallererst mit der Überprüfung der Internetverbindung zu beginnen. Aus diesem Grund wurde ein Testcase entwickelt, der überprüft, ob das zu testende Modem eine erfolgreiche Verbindung mit dem Internet herstellen kann. Eine Überprüfung der Stabilität, also der Test ob die Verbindung über einen definierten Zeitraum ohne Schwankungen oder Abbrüche besteht ist jedoch sehr schwierig. Wie im Theorieteil der Arbeit genauer ausgeführt liegt das daran, dass dieser Test sehr schnell von externen Einflüssen wie der Leitungsqualität oder Netzwerkauslastung abhängt und diese Bedingungen sehr schwer zu kontrollieren sind. Eine reproduzierbare Testautomatisierung kommt hier an seine Grenzen. Es gelang dennoch einen Testcase zu entwickeln der eine Aussage über den ordnungsgemäßen Verbindungsaufbau zwischen Modem und Internet zulässt.

5.2 Ethernet

Um die Ethernet-Schnittstellen zu testen ist es wichtig, die unterschiedlichen Datenraten die von den Schnittstellen an Modems unterstützt werden zu berücksichtigen. Auch soll die Full- und Half-Duplex Fähigkeit der Modems überprüft werden. Daten können dabei übertragen werden, wenn auf beiden Seiten der Leitung die Ethernet-Anschlüsse den gleichen Standard unterstützen. In diesem Zusammenhang soll die Fähigkeit der Modems der Auto-Negotiation überprüft werden. Hierbei handeln sich Modem und Client die maximal mögliche Datenrate und den Duplex-Modus automatisch aus. Unterstützt das Modem beispielsweise 10 MBit/s, 100 Mbit/s und 1 GBit/s, das Client Gerät aber nur 10 MBit/s und 100 Mbit/s, so wird die Verbindung auf 100 Mbit/s ausgehandelt. Das gleiche gilt auch für den Full und Half-Duplex Modus. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, das Ethernet-Interface am Testhead vorzukonfigurieren, beispielsweise auf 10 Mbit und Full-Duplex und zu testen, ob zwischen Modem und Testhead eine Verbindung hergestellt werden kann. Wenn nun die Auto-Negotiation und damit die verfügbaren Datenraten und Full- und Half-Duplex Fähigkeit der Modems überprüft werden sollen ist es notwendig, über die Schnittstellen Daten zu übertragen. Dazu wird über jede LAN Schnittstelle ein eigner HTTPs Download von einem Webserver durchgeführt. Dazu wurde ein Webserver eingerichtet der über seine IP-Adresse erreichbar ist. Auf diesem ist ein 1GB großes File, das mit Random Daten gefüllt ist abgelegt und es wird überprüft ob der Download ordnungsgemäß erfolgt.

5.3 WLAN Security

Eine weitere Hardwareanforderung betrifft den Bereich des WLANs. Die Entwicklung eines geeigneten Testcases erwies sich als äußerst schwierig und komplex. Allen voran betrifft dies die technischen und örtlichen Gegebenheiten in denen die Testautomatisierung durchgeführt wird. Es können äußere Störungsfaktoren wie andere WLAN-Signale die für Interferenzen sorgen würden, nicht ausgeschlossen werden, wodurch eine Reproduzierbarkeit der Tests erschwert wird. Die Ermittlung einer maximalen Übertragungsrate oder einer maximalen Reichweite der eingebauten Module ist nicht zielführend, da schwankende Umgebungsbedingungen die WLAN-Leistung beeinflussen. Die WLAN-Tests beschränken sich daher auf die Anforderungen im Sicherheitsbereich. Die Verschlüsselungsstandards WEP und WPA sind bereits gecrackt und bieten daher, wie ein offenes WLAN, keine Sicherheit mehr. Daher wird auf das Testen dieser Verschlüsselungen in der Arbeit verzichtet. Der WPA2 Standard ist noch sicher und wird von allen Modems die bei der Telekom Austria im Einsatz sind unterstützt. Daher wird dieser Verschlüsselungsstandard durch die Testautomatisierung überprüft. Der entwickelte Testcase arbeitet mit den gängigen Frequenzen 2.4GHz und 5GHz und ist auch schon für den Einsatz von 6GHz vorbereit. Zu beachten ist, dass Modems auch Band Steering unterstützen können. Dabei analysiert das Modem die Verbindungsanforderung und verbindet das Gerät automatisch mit dem weniger frequentierten Band. Um diese automatische Bandsteuerung zu umgeben wurden zwei Testcases entwickelt die am Testhead nur gezielt das 2.4GHz oder 5GHz Frequenzband einsetzen.

5.4 USB-Dienste

Da Modems in der Lage sind, einfache NAS Systeme nachzubilden, unterstützen sie Funktionen wie einen File- oder Medien-Server. Dies macht die Überprüfung dieser Dienste erforderlich.

Begonnen wurde mit der Entwicklung eines Testcases zur Überprüfung des File-Servers. Da der File-Server die Aufgabe hat, die über die USB-Schnittstelle angeschlossenen Speichermedien zu verwalten und dem Endanwender die Inhalte zugänglich zu machen. Es wurde ein Testcase entwickelt der identifiziert, welche der gebräuchlichsten Dateisysteme über die USB-Schnittstelle verfügbar sind. Es wird davon ausgegangen, dass sobald das File System richtig angezeigt wird und auf Daten zugegriffen werden kann, der File-Server ordnungsgemäß funktioniert.

Das Hauptziel dieses Testcases ist es, die unterstützten Dateisysteme zu identifizieren um dadurch sicherzustellen, dass der File-Server des Modems korrekt funktioniert. Softwareseitig gibt es bei den USB-Diensten noch eine zweite Anforderung. Die Modems müssen in der Lage sein, verschiedene Multimedia Inhalte korrekt wiederzugeben. Um diese Inhalte abzuspielen wird am Modem der Medien-Server verwendet. Bei der Entwicklung dieses Testcases wurde der Ansatz verfolgt, dass der Medien-Server korrekt funktioniert, wenn ein Video von einem am Modem angeschlossenen USB-Speichermedium abgespielt werden kann.

Da am Testhead nur ein Modem angeschlossen ist, wird nur ein Medien-Server gefunden. Der Medien-Server stellt die Inhalte der USB-Speichermedien dem Medien-Player zum Abspielen zur Verfügung. Da unter Linux zur Zeit kein kostenloser Medienplayer bekannt ist, der sinnvolle Statistik Daten wie die Frame-rate, dropped oder duplicate Frames liefert, werden während des Abspielens des Videos Screenshots gemacht. Sind die Bilder unterschiedlich, so kann davon ausgegangen werden, dass die Medienwiedergabe erfolgreich war. Auf ein separates Testen der USB-Hardwareschnittstelle wird verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass wenn auf Inhalte der Speichermedien zugegriffen werden kann der Hardware-Anschluss einwandfrei funktioniert.

5.5 Telefonservice

Ein weiterer wichtiger Dienst in einem Modem ist das Telefonservice das Sprachkommunikation zwischen zwei Endgeräten ermöglicht. Um diesen Dienst zu testen wurde ein Testcase entwickelt, der überprüft ob der Telefondienst von Modems ordnungsgemäß funktioniert. Ziel des Testcases ist es, dass über das Modem eine Telefonverbindung korrekt aufgebaut, Sprachdaten zuverlässig übertragen und die Verbindung ordnungsgemäß beendet wird. Mit diesem Testcase soll die Sprachkommunikation über Festnetz überprüft werden.

Dazu wird ein analog Modem mit Voice Funktion genutzt, das die Funktionen von analog Telefonen nachbildet. Um zu überprüfen ob ein Anruf über das Modem hergestellt werden kann, muss zuallererst eine Nummer definiert werden die angerufen werden soll. Bei der festgelegten Nummer muss sichergestellt werden, dass diese immer erreichbar ist. Ebenfalls muss es eine Rufnummer sein die selbsttätig abhebt und ein Audiosignal selbstständig ausgibt. Von der Telekom Austria werden heute noch bestimmte Dienste, wie die Zeitansage, die die aktuelle Uhrzeit ansagt, angeboten. Dieser Dienst kann auch heutzutage noch angerufen werden und bietet zusätzlich den Vorteil, dass er immer ein sehr markantes Audiosignal bereitstellt, dass aufgenommen werden kann.

Das aufgenommene Audiosignal kann im Anschluss sehr gut anhand eins Spektrogramms dargestellt werden. Die automatisierte Auswertung des Spektrogramms erweist sich allerdings als sehr schwierig, da die Zeitansage immer eine andere Uhrzeit ansagt und daher das Audio Signal immer ein anderes Spektrogramm liefert. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der automatisierten Auswertung ist eine manuelle Analyse in diesem Fall unumgänglich. Es ist daher erforderlich, das Spektrogramm als auch die Audiodatei manuell zu überprüfen.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Bei der Telekom Austria sind derzeit 15 verschiedene aktive Modemtypen im Einsatz. Die Modelle teilen sich auf die Modemhersteller ADBB, AVM, Huawei, Technicolor, ZTE und Zyxel auf. Aus den verfügbaren Modellen wurden drei ausgewählt, die sich und vergleichbare Modems gut repräsentieren. Dies ist die AVM FRITZ!Box 7590AX zur Repräsentation der Premium Modelle, das Zyxel DX3101 als aktuelles Standard-Modem und das ADBB VV2220 ,welches sich derzeit in Ablöse befindet aber immer noch im Feld ist. Die ausgewählten Modems sind in Tabelle 1 angeführt. Diese Modems wurden mit der entwickelten Testsuite und der in ihr enthaltenen Testcases überprüft.

Modem-Bezeichnung	Vendor	Firmware-Version	Modell-einführung
AVM	FRITZ!Box 7590AX	7.90-114960 BETA	Q4 2021
Zyxel	DX3101	V5.50(ACIM.0)b7_MU	Q4 2020
ADBB	VV2220	9.5.8	Q4 2016

Tab. 1: Modem Modelle

4.1 CPE Abnahme Testsuite

Die CPE Abnahme Testsuite bildet die Basis der Testautomatisierung. In ihr sind alle Testcases enthalten die die Funktionalitäten des Modems überprüfen. Auch werden in der Testsuite die Inputs und damit die physikalischen Schnittstellen festgelegt mit denen das Modem mit dem Testhead verbunden ist. In Abbildung 3 ist der Aufbau der Testsuite zu sehen. Die Testcases werden hintereinander ausgeführt um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden.



Abb. 3: Testsuite CPE Abnahme

Die CPE Abnahme Testsuite führt jeden der beschriebenen Testcases hintereinander aus, beginnend mit dem Check Internet Connection Testcase. Sobald die Testsuite abgeschlossen ist, wird automatisiert ein Report generiert der sich in weiterer Folge analysieren lässt.

5. ANALYSE UND INTERPRETATION DER TESTERGEBNISSE

Für die beschriebene Testsuite wurden drei Jobs in der ABS-Testplattform durchgeführt. Es wurde je ein Job für das Premium Modell die AVM FRITZ!Box 7590AX und die beiden Standard-Modems Zyxel DX3101 und ADBB VV2220 ausgeführt. Die ABS-Plattform bietet durch den Job die Möglichkeit schon während der Laufzeit eine erste Aussage über den Testverlauf zu geben, da im Flussdiagramm jeder erfolgreiche Testcase und Block grün und jeder fail rot eingefärbt wird. In der Testsuite für das Zyxel und das ADBB Modem wurden alle Testcases erfolgreich ausgeführt. Bei dem AVM Modem zeigt der Testcase für den DLNA Video Player einen Error an. Das Ergebnis für die AVM FRITZ!Box 7590AX ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Testcases wurden einzeln analysiert und zusätzlich zum Testergebnis im Job werden die Ergebnisse der Testsuite auch in Form eines PDF-Berichts in der Plattform gespeichert.

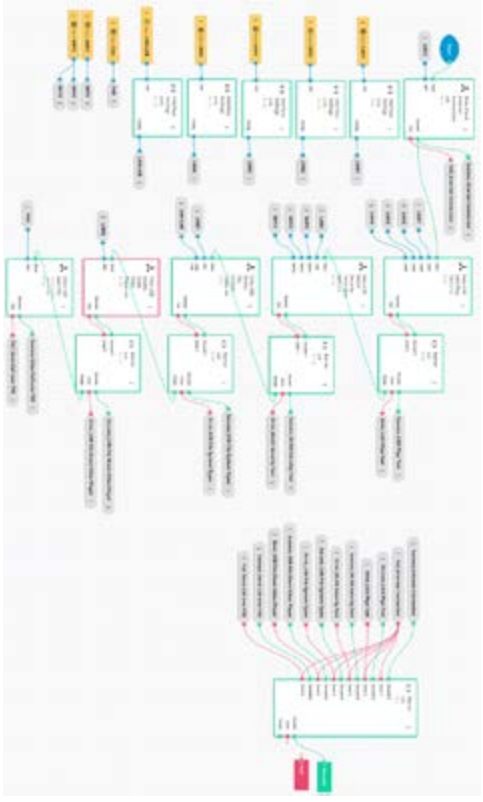


Abb. 4: Testergebnis Job CPE Abnahme Testsuite AVM FRITZ!Box 7590AX

Da die Testsuite für das Zyxel und das ADBB Modem für alle Testcases erfolgreich ausgeführt wurde, wird in Folge nur auf die Testsuite des AVM Modems und den Testcase für den DLNA Video Player genauer eingegangen. Dieser Testcase ist bei seiner Ausführung als einziger fehlgeschlagen. Aus dem vorherig durchgeführten File System Types Testcase ist bekannt, dass auf die File Systeme der FRITZ!Box zugegriffen werden konnte und diese richtig erkannt wurden. Durch das Logfile des Testcases konnte ermittelt werden, dass der Medien-Server des Modems keine Medieninhalte auf keinem der Speichermedien gefunden hat. Um zu überprüfen ob der Testcase korrekt funktioniert hat und das Modem tatsächlich keine Medieninhalte erkennt, wurde die FRITZ!Box nach der Durchführung der Testsuite vom Testhead getrennt und mit einem externen Rechner verbunden. Das Modem wurde neu gestartet, damit beim erneuten Anschließen der USB Speichermedien an das Modem ein Initialisierungsfehler ausgeschlossen werden konnte. Anschließend wurde manuell überprüft ob über den verbundenen Rechner Mediendateien gefunden werden konnten und ob auf sie zugegriffen werden kann. Es hat sich gezeigt, dass keine Mediendateien gefunden werden konnten. Daher kann die Aussage getätigt werden, dass der Testcase richtig funktioniert und dass bei der FRITZ!Box 7590AX mit der Firmware 7.90-115631 Beta der Zugriff und das Abspielen von Mediendateien nicht richtig funktioniert.

Für die gesamte Testsuite lässt sich folgendes festhalten. Sie benötigt in ihrer Ausführung um die 40 Minuten und arbeitet während dieser Zeit selbstständig alle in ihr enthaltenen Testcases ab. In diesem Zeitraum bis zum Abschluss der Testsuite ist kein manuelles Eingreifen erforderlich. Die Testautomatisierung bietet ebenfalls den Vorteil, dass unterschiedliche Modems von unterschiedlichen Testheads gleichzeitig mit der selben Testsuite überprüft werden können. Durch das parallele Ausführen der Testsuiten kann jedes Modem auf einer anderen ADSL, VDSL, GPON oder Glasfaserschnittstelle angeschlossen sein, wodurch das Testen der Modems viel effizienter gelingt.

Obwohl die Testautomatisierung einige Vorteile bietet, gibt es auch Herausforderungen die sich bei ihrer Einführung gezeigt haben. Eine der größten Herausforderungen ist die Entwicklung der Testcases für die unterschiedlichen physikalischen Schnittstellen, Dienste und Funktionen. Diese Vielfalt erfordert es, unterschiedliche Testcases zu entwickeln, die den jeweiligen Testbedarf abdecken. Der Aufwand für die Erstellung dieser automatisierten Testcases ist je nach Funktionalität sehr hoch. Eine weitere Aufgabe bestand auch darin, die Testautomatisierung in der Laborumgebung und mit der verwendeten Hardware umzusetzen. Wie bereits bekannt, werden zur Überprüfung der Modems die ABS-Testheads eingesetzt. Es ist somit immer eine direkte Verbindung zwischen Modem und Testhead erforderlich. Da die Testheads aber nicht alle am Modem zu testenden Schnittstellen unterstützen ist es für den Voice Call Testcase notwendig, dass neben dem Testhead auch ein Analog Modem eingesetzt wird. Besonders relevant wird die Hardware Thematik auch beim WLAN Security Testcase. Bei diesem wird der Verschlüsselungsstandard sowohl mit der 2,4 als auch 5 GHz Frequenz gleichzeitig getestet. Da der Testhead pro Gerät jedoch nur ein WLAN-Modul unterstützt, ist es erforderlich, dass für jede Frequenz ein eigener Testhead verwendet wird. Dies gilt es entsprechend in der Testsuite und in der Implementierung der Testcases zu berücksichtigen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Testautomatisierung eine wichtige Komponente ist, um eine verbesserte Effizient beim Testen zu erreichen. Es gibt jedoch auch Herausforderungen, insbesondere bei der Entwicklung und der Anpassung der Testcases an zukünftige Anforderungen. Es ist daher wichtig, die Testautomatisierung schrittweise einzuführen, um so einen langfristigen Erfolg sicherzustellen.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In Telekommunikationsunternehmen gibt es im Bereich der DSL-Modems einen enormen Testbedarf. Bestellt ein Kunde ein Internetservice, so wird ihm vom Provider ein DSL-Modem zur Verfügung gestellt. Diese Modemtypen werden mit Leistungsversprechen über die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit an die Kunden ausgegeben, die eingehalten werden müssen. Um dies zu erreichen ist es notwendig die DSL-Modems gründlichen Tests zu unterziehen. Aus diesem Grund setzt man sich in dieser Arbeit mit der Testautomatisierung von DSL-Modems auseinander.

Das Primärziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Testautomatisierung für den Einsatz an DSL-Modems. Auf Grundlage bestehender Forschung und dem Einbringen eigener Ideen und Ansätzen wurde eine Testautomatisierung entwickelt die manuelle Eingriffe auf ein Minimum reduziert. Das Ziel der entwickelten Testsuite ist es, die Hardware Anforderungen sowie die Dienste und Funktionen der DSL-Modems zu überprüfen. Mit dieser Arbeit soll dadurch ein Beitrag zur verbesserten Qualitätssicherung von DSL-Modems geleistet werden. Um dies zu erreichen wurden die technischen und funktionalen Grundlagen von DSL-Modems identifiziert. Anhand dessen wurde der Testbedarf in den Bereichen der Hard- und Software ermittelt. Dabei erfolgte die Identifikation des Testbedarfs aus der Perspektive des Providers und nicht aus der Sicht der Hardwareentwicklung des Herstellers. Im Anschluss wurde mit der Entwicklung der Testautomatisierung begonnen. Ausgangspunkt bildete der aus der Literaturrecherche ermittelte Testbedarf bei DSL-Modems. Der Fokus in dieser Arbeit lag auf der Konzeption der Testsuite und der darin enthaltenen Testcases. Bei der Entwicklung der Testautomatisierung wurde das Hauptaugenmerk auf die Überprüfung der vom Modem angebotenen Dienste und Services gelegt, da hier auch die verwendeten physikalischen Schnittstellen mitgetestet werden. Im Anschluss an die Entwicklung der Testautomatisierung wurden die Testcases in der ABS-Testplattform umgesetzt. Die entwickelte Testsuite wurde in Folge auf drei ausgewählten Modems angewendet. Diese sind die AVM FRITZ!Box 7590AX, das Zyxel DX3101 und das ADBB VV2220.

Jedes dieser Modems wurde mittels der entwickelten Testsuite überprüft indem je ein Job ausgeführt wurde. Der Job bietet die Möglichkeit schon während der Laufzeit eine erste Aussage über den Testverlauf zu geben, da im Flussdiagramm jeder erfolgreiche Testcase und Block grün und jeder fail rot eingefärbt wird.

Die Testsuite und die Testcases wurden in weiterer Folge genauer analysiert. Sofort ersichtlich war, dass in der Testsuite für das Zyxel und das ADBB Modem alle Testcases erfolgreich ausgeführt wurden. Beim AVM Modem zeigte der Testcase für den DLNA Video Player einen Fehler an. Dies bedeutet, dass dieser Testcase genauer auf die Ursache des Fehlers zu kontrollieren war. Zusätzlich zum Testergebnis im Job werden die Ergebnisse der Testsuite auch in Form eines PDF-Berichts in der Plattform gespeichert. Nach der Analyse aller Testcases wurden die Ergebnisse Interpretiert.

Es hat sich gezeigt, dass die Testautomatisierung von DSL-Modems sowohl Chancen bietet als auch zu Herausforderungen führt. Die Testautomatisierung hat immer das Ziel, die Effizienz der Tests zu steigern und den Grad der Automatisierung zu erhöhen. Die Testautomatisierung bietet dabei den Vorteil, dass der manuelle Testaufwand reduziert werden kann. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Testautomatisierung eine wichtige Komponente ist, um eine verbesserte Effizienz beim Testen zu erzeugen. Die Umsetzung einer Testautomatisierung erfordert gerade zu Beginn sehr hohe Investitionen an Zeit und Ressourcen bevor erste Erfolge eintreten. Es ist daher wichtig, schon zu Beginn eine gute Teststrategie zu verfolgen.

FELIX FÜHRINGER



Felix Führinger, M.Sc.

A1 Telekom Austria, Arsenal Objekt 24 1030 Wien, E-Mail: felix.fuehringer@a1.at

HTL - Mödling „Mechatronik“ Matura 2016, Studium FH Wiener Neustadt „Wirtschaftsingenieur“ Abschluss Bachelor of Science 2020 und Master of Science 2022, Masterstudiengang FH Wiener Neustadt „Mechatronik“ Spezialisierung „Mechatronic Systems“ 2022 bis 2024, A1 Telekom Austria „Engineering and Systems“ seit 2021

PERFORMANCE MODEL EINER VANADIUM-REDOX-FLOW-BATTERIE

Florian Gruber, BSc.

Kurzfassung: *Vanadium-Redox-Flow-Batterien haben ein großes Potenzial als langfristige Energiespeicher. Um einen effizienten Betrieb zu gewährleisten, müssen optimale Betriebspunkte gefunden werden. Dazu werden oft kosten- und zeitintensiv Prototypen gefertigt. Um diesen Prozess zu vereinfachen, wird in dieser Masterarbeit ein mathematisches Simulationsmodell entworfen, um das Verhalten einer Batterie und im speziellen, das eines einzelnen Stacks zu simulieren. Das Gesamtmodell besteht aus mehreren Teilmodellen, die verschiedene elektrochemische Effekte beschreiben. Das Gesamtmodell wird mithilfe von realen Daten angepasst und mit ihnen verglichen. Es kann nachgewiesen werden, dass das mathematische Modell die realen Daten mit einigen Einschränkungen zufriedenstellend beschreibt und daher auch zur weiteren Analyse von Vanadium-Redox-Flow-Batterien eingesetzt werden kann.*

Schlüsselwörter: *Vanadium-Redox-Flow-Batterie, Batteriemodel, Simulation.*

1. EINLEITUNG

Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VRFB) sind langfristige elektrochemische Energiespeicher. Zu den Anwendungsgebieten gehören die Optimierung der Energiekosten, die Optimierung von erneuerbaren Energiequellen oder die Notversorgung kritischer Infrastruktur. Erneuerbare Energiequellen stellen eine erhebliche Belastung für das Stromnetz dar, da sie nicht ständig Strom liefern. Das hat zur Folge, dass Strom zu Zeiten erzeugt wird, in denen wenig verbraucht wird. Energiespeicherung ist erforderlich, um diese ansonsten verschwendete Energie zu speichern. [Sun et al. 2020]

Wenn Energie gespeichert wird, sind Speicherverluste unvermeidlich. Um ein Energiespeichersystem so effizient wie möglich zu gestalten, müssen diese Verluste minimal sein. Eine VRFB besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten. Auf der einen Seite steht der Elektrolyt, der die Energie durch einen chemischen Prozess speichert, und zum anderen aus den Stacks, die für die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie zuständig sind. Diese beiden Komponenten werden von verschiedenen Faktoren aus der Umwelt oder dem Batteriesteuerungssystem beeinflusst. Einer dieser Faktoren sind die Kosten sowie die Ansteuerung der Batteriekomponenten. In einer VRFB kann die Menge an Elektrolyt unabhängig von den Stacks verändert werden. Deshalb wird in dieser Arbeit ein Simulationsmodell entwickelt, das die Leistung und andere wichtige Parameter der Batterie in verschiedenen Betriebszuständen und Konfigurationen korrekt darstellen kann. Einige Daten der realen Batterie sind bereits verfügbar, die bei der Entwicklung des Modells helfen, aber auch zu dessen Verifizierung verwendet werden können. Dazu muss die Batterie zunächst in einzelne Blöcke unterteilt werden, die leicht modelliert und verifiziert werden können. Anschließend werden die einzelnen Teile zu einem Gesamtmodell zusammengefügt, dass die gesamte Batterie repräsentiert. Die Ergebnisse dieses Modells können zur Optimierung der Batteriesteuerung verwendet werden, sodass die Batterie immer mit der größtmöglichen Effizienz betrieben wird. Das Modell kann aber auch die Entwicklung unterstützen, indem es aufzeigt, welche Konfiguration das beste Effizienz-Kosten-Verhältnis bietet.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Durch den großflächigen Ausbau von erneuerbaren Energien wird das Stromnetz immer stärker belastet, da Produktion und Verbrauch nicht immer gleichzeitig stattfinden. Hier schaffen Energiespeicher die Möglichkeit, die produzierte Energie zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt ins Stromnetz einzuspeisen. Chemische Energiespeicher haben den Vorteil, dass sie standortunabhängig aufgestellt und dadurch nahe am Stromerzeuger platziert werden können. Vor allem Vanadium-Redox-Flow-Batterien bieten zusätzlich den Vorteil, dass sie eine langfristige Energiespeicherung von über 8 Stunden zulassen. Das ist vor allem bei Photovoltaik Anlagen relevant, da diese nur unter Tags produzieren. In der Nacht könnte somit eine Batterie die Stromerzeugung übernehmen.

Damit möglichst viel Energie möglichst effizient gespeichert wird, müssen die einzelnen Batteriekomponenten möglichst effizient funktionieren. Dies bedeutet eine ständige Weiterentwicklung der Einzelkomponenten. Einen großen Teil der Gesamteffizienz wird über die Effizienz der Stacks bestimmt. Der Stack wiederum ist eine komplexe Komponente die aus mehreren Einzelkomponenten besteht. Es ist essentiell, dass die Spezifikationen dieser Einzelkomponenten ständig weiterentwickelt und getestet werden. Außerdem müssen Auswirkungen von Spezifikationsänderungen, etwa durch Herstellerwechsel, geprüft werden.

Dazu werden Prototypen gebaut und auf verschiedensten Teststänten geprüft. Dieser Prozess ist kosten- sowie zeitintensiv, da für jede geänderte Einzelkomponente mehrere Prototypen gebaut und über längere Zeit getestet werden müssen.

Aufgabe dieser Masterarbeit ist, die Auswirkung von Änderungen in der Spezifikation und im Aufbau eines Stacks schneller und günstiger abzubilden als durch den Bau von n Prototypen. Es sollen die Auswirkungen auf die Performance der Stacks dargestellt werden.

3. MODELLIERUNG EINER VRFB

Eine Vanadium-Redox-Flow-Batterie besteht im Wesentlichen aus mehreren Stacks und dem Elektrolyt. Wobei der Stack hauptverantwortlich für die Performance ist und in dieser Arbeit als zentrales Bauteil betrachtet wird. Ein Stack besteht aus mehreren chemischen Zellen. Durch jede dieser Zellen fließt Elektrolyt. Wie in Abb. 1 zu sehen, besteht eine Zelle aus zwei Kammern, die durch eine Membrane getrennt sind. Durch eine Kammer fließt das Anolyt und durch die andere das Katholyt. An den Außenseiten befinden sich Elektroden, die elektrisch kontaktiert werden. In jeder Kammer findet eine chemische Reaktion statt. Das Katholyt wird an der Elektrode

reduziert und das Anolyt oxidiert, dadurch wird elektrische Energie erzeugt. Die Membran verhindert das Mischen des Elektrolyten. Da es sich um eine wiederaufladbare Batterie handelt, sind die Reaktionen reversibel. [Pletcher und Walsh 1993]

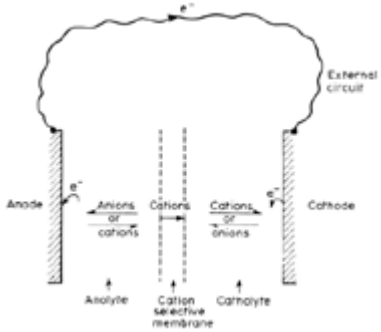


Abb. 1: Elektrochemische Zelle [Pletcher und Walsh 1993]

Die Performance eines Systems wird über die Verluste bestimmt, die beim Umwandeln der chemischen in elektrische Energie auftreten. Die Zellspannung E_{cell} setzt sich aus drei Teilen zusammen

$$E_{cell} = E_{e,p} + E_{e,n} + \sum\eta + i \cdot R_{cell} \quad (1)$$

wobei $E_{e,n/p}$ das negative bzw. positive Equilibrium-Potenzial, η das Überpotential, i den Strom durch die Zelle und R_{cell} den ohmschen Innenwiderstand der Zelle beschreibt. [Huang 2021] Dieser ergibt sich wiederum aus

$$R_{cell} = R_{currentcollector,n} + R_{elyt,n} + R_{membrane} + R_{elyt,p} + R_{currentcollector,p}\,. \quad (2)$$

wobei $R_{currentcollector,n/p}$ den Widerstand des Stromableiters, $R_{elyt,n/p}$ den Widerstand des Elektrolyten und $R_{membrane}$ den Widerstand der Membran darstellt. Die Stromdichte I durch einen Stack kann mit der Butler-Volmer Gleichung

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_{symO} nF}{RT}\eta\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_{symR} nF}{RT}\eta\right)\right] \quad (3)$$

Berechnet werden, wobei I_0 die Austauschstromdichte und $\alpha_{symO/R}$ die Ladungstransferkoeffizienten für Oxidations- und Reduktionsreaktion, n die Anzahl der Elektronen, F die Faraday-Konstante, R die allgemeine Gaskonstante, T die Temperatur des Elektrolyten und η das Überpotential beschreibt. [Dickinson und Wain 2020] Die Austauschstromdichte I_0 lautet

$$I_0 = F k_0 c_O^{1-\beta} c_R^{\beta}, \quad (4)$$

wobei k_0 die Reaktionskonstante, β eine Symmetriekonstante und $c_{O/R}$ die Konzentration der oxidierenden bzw. der reduzierenden Spezies ist. [Lu et al. 2021] Der Ladegrad SOC (state of charge) einer Batterie wird über das Verhältnis der Konzentrationen zu

$$SOC = \frac{c_O}{c_R + c_O} \quad (5)$$

berechnet. Dabei ist c_O die Konzentration der oxidierenden Spezies und c_R die Konzentration der reduzierenden Spezies. [Kim et al. 2018] Die Änderung des Ladegrads ΔSOC lässt sich bestimmen mit

$$\Delta SOC = \frac{I}{v_p c F} \quad (6)$$

wobei v_p der Durchfluss in der Zelle und c die Konzentration des Vanadiums ist. Für die Änderung des gesamten SOC im Verhältnis zum Gesamtvolumen im Tank V_{tank} gilt

$$\frac{d}{dt} SOC = \frac{v_p}{V_{tank}} \Delta SOC. \quad (7)$$

Die Temperatur des Elektrolyten erhöht sich beim Entladen und verringert sich beim Laden. Diese Temperaturänderung wird über zwei Vorgänge beschrieben. Einerseits erwärmt sich das System durch die Verluste am elektrischen Widerstand laut

$$\partial Q = I^2 R \quad (8)$$

Wobei ∂Q die erzeugte Wärme, R den Stackwiderstand und I den Strom beschreibt. Andererseits wird über den thermogalvanischen Effekt das System je nach Betriebszustand erwärmt oder abgekühlt. Dieser Effekt kann über die Differenzialgleichung

$$\frac{1}{T} dT = \frac{-\alpha_{therm} nFc}{C_p} dSOC \quad (9)$$

beschrieben werden, wobei T die Temperatur des Elektrolyten, α_{therm} der thermische Koeffizient, n die Anzahl der Elektronen, F die Faraday Konstante, c die Konzentration, C_p die Wärmekapazität und $dSOC$ die Änderung des SOC beschreibt. [Reynard et al. 2018], [Rajan uns Yee 2022] Es gibt verschiedenste Methoden, die Performance eines Stacks zu bestimmen. In den hier vorhandenen Messdaten wird die Performance über den Stackwiderstand R_{Stack} bestimmt,

$$R_{Stack} = \frac{E_{Stack} - N_{cell} \cdot OCV}{I_{Stack}}. \quad (10)$$

Mit der Stackspannung E_{Stack}, der Anzahl der Zellen N_{cell}, der OCV-Spannung und dem Strom durch den Stack I_{Stack}. [Fink 2019]

Die Batterie selbst besteht aus mehreren Komponenten, die über eine Software gesteuert werden. In der zentralen Steuerungseinheit der Batterie kommen alle Messdaten zusammen und werden dort verarbeitet. Unter anderem wird die Spannung des Stacks, der Strom, die Temperatur und der Druck gemessen. Die Steuerung ermittelt daraus die maximale Leistung, die am Stack angelegt werden darf und reduziert diese gegebenenfalls.

4. ENTWICKLUNG DES SIMULATIONSMODELLS

Für die Darstellung der Stackperfomance wird ein numerisches Modell in Simulink erstellt. Dieses wird in verschiedene Teilmodelle aufgeteilt. Zuerst wird ein Basismodell erstellt, in dem alle Grundfunktionalitäten abgebildet sind. Dann werden Verbesserungen an der Genauigkeit umgesetzt und weitere Funktionalitäten

eingebaut, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht ist. In jedem Verbesserungsschritt wird die Simulation mit den vorhandenen Messdaten verglichen und die entsprechenden Parameter optimiert. In den folgenden Abschnitten werden alle Teilmodelle beschrieben. Es werden Fitting Parameter definiert, um das Modell an die Messdaten anzupassen. Alle Parameter werden in einem Matlab-Skript definiert, in welchem auch die gesamte Auswertung stattfindet.

Die zur Validierung verwendeten Messdaten werden im Vorhinein an einem Teststand gesammelt. Wobei jeweils ein Stack, mehrere Lade-/Entlade-Zyklen lang betrieben wird, und alle relevanten Daten durchgehend aufgezeichnet werden. Das Modell soll den Teststand nachbilden, damit die Daten vergleichbar sind.

Die relevanten Werte sind Strom, Spannung, Widerstand und Temperatur. Aus den Testdaten werden die nicht verwertbaren Daten entfernt. Außerdem werden die Modell-Daten so komprimiert, dass sie direkt mit den Testdaten vergleichbar sind. Zum Vergleichen der verschiedenen Versionen wird der R^2 Wert herangezogen.

4.1 Control Unit

Das erste Teilmodell ist die Control Unit, die die Leistungsvorgabe steuert und SOC-Grenzen beinhaltet. Zunächst besteht das Modell aus einer konstanten Leistungsvorgabe, die nicht auf andere Einflüsse reagiert. Über- oder unterschreitet der SOC die eingestellten Grenzen, wird die Simulation gestoppt und damit der Lade- oder Entladevorgang beendet.

Dann wird ein PID-Regler für die Leistungsvorgabe integriert. Wobei die Regelabweichung aus Stackspannung und Spannungslimit berechnet wird. Wenn der eingestellte Spannungswert überschritten wird, reduziert der PID-Regler die Leistung. Die finalen Regelparameter werden durch das Testen verschiedenster Konfigurationen gefunden und sind in Tab. 1 zu sehen. Im PID Regler ist eine Anti-Wind-Up-Maßnahme integriert.

Parameter	Wert
P	250
I	2000
D	0
Sättigung oben	Max. Leistung
Sättigung unten	-Max. Leistung
Anti-Windup	Back calculation

Tab. 1: Finale Reglerparameter

4.2 Überpotential

Das zweite Teilmodell beinhaltet die Berechnung des Überpotentials. Über den Strom und den SOC wird hier zuerst nach Glg. (4) die Austauschstromdichte berechnet und daraus das Überpotential. In der ersten Version wird das Überpotential mit der nur eingeschränkt nutzbaren Tafel-Gleichung berechnet. Diese Gleichung wird angewandt, weil angenommen wird, dass das Überpotential und der Strom hoch sind.

Bei der Auswertung wurde jedoch festgestellt, dass diese Annahme falsch ist. Deshalb wird im zweiten Schritt die Berechnung über die Butler-Volmer-Gleichung (3) eingeführt, welche deutlich bessere Ergebnisse liefert.

4.3 Stackspannung

In diesem Teilmodell wird die Zellspannung und damit die Stackspannung aus den Bestandteilen von Glg. (1) berechnet. Aus der berechneten Spannung und der Leistungsvorgabe wird dann der Strom bestimmt.

Ein Bestandteil der Stackspannung ist die OCV-Spannung. Diese wir mithilfe einer bei CellCube entwickelten Näherung in aus dem SOC berechnet. Diese ist in einer ersten Version in einer Look-Up-Table hinterlegt. Später wird die Gleichung implementiert, um auch den Einfluss der Temperatur berücksichtigen zu können.

4.4 SOC-Änderung

Wie in Gleichung (6) zu sehen ändert sich der SOC in Abhängigkeit vom Strom und dem Durchfluss. Da in diesem Modell der Durchfluss als konstant gewählt wird, ist für die Änderung nur der Strom relevant.

4.5 SOC-Tank

Im nächsten Teilmodell wird der SOC im Tank berechnet. Es wird angenommen, dass der zurückfließende Elektrolyt und der Elektrolyt im Tank ideal durchmischt werden. Dieser Prozess wird über Glg. (7) beschrieben. Der berechnete SOC beschreibt nun den SOC im Tank. In der ersten Version wird aus diesem SOC die Stackspannung berechnet. Jede Zelle in einem Stack hat jedoch eine räumliche Ausdehnung. Während des Ladens steigt der SOC in einer Zelle über die Länge an. Die Verteilung des SOCs zwischen Einlass und Auslass wird als linear angenommen. Deshalb wird in der zweiten Version ein Mittelwert von ein- und ausströmendem SOC berechnet. Mit diesem wird das Überpotential und die OCV-Spannung berechnet.

4.6 Stack-Widerstand

Als Hauptindikator für die Performance wird der Stackwiderstand benutzt. Der Widerstand wird mit Glg. (10) berechnet und wurde im Modell implementiert. Der Widerstand wird über den gesamten Zyklus aufgezeichnet und am Ende mit den Messdaten verglichen.

4.7 Couloumb & Shunt-Effizienz

Da die Shunts und die Coloumb'sche Effizienz nicht in anderen Modellen beschrieben werden können, wird dafür ein eigenes Modell erstellt. Nachdem beide Effekte miteinander beschrieben werden können, werden Sie auch in ein gemeinsames Modell implementiert. Die Effekte werden über eine einfache Reduktion des Stromes um einen konstanten Wert beschrieben.

4.8 Temperatur

Als letztes Teilmodell wird die Temperatur implementiert, die sich aus zwei Effekten zusammensetzt. Aufgrund der Joulschen Erwärmung verursacht der Strom durch den ohmschen Widerstand Verluste im Stack, welche zu einer Erwärmung führen, Glg. (8). Des Weiteren wirkt auch der thermogalvanische Effekt, Glg. (9). Dieser führt dazu, dass beim Laden der Elektrolyt abgekühlt und beim Entladen erwärmt wird. Beide Effekte treten immer gleichzeitig auf. Im Modell werden sie addiert. Es wird angenommen, dass der Elektrolytkreis ein geschlossenes System bildet, in dem es keinen Wärmeaustausch mit der Umgebung gibt. Außerdem wird wie auch schon beim SOC angenommen, dass der Elektrolyt im Tank immer ideal durchmischt wird. Auch zur

Berechnung der Temperatur im Tank wird Glg. (7) benutzt wie beim SOC in Kapitel 4.5.

Da die OCV-Spannung und die Reaktionsrate k_0 temperaturabhängig sind, wird diese Abhängigkeit ebenfalls implementiert. Dabei wird anstelle der Reaktionsrate k_0 eine temperaturunabhängige Reaktionsrate k_{0T} eingeführt, welche in weiterer Folge auch als Fitting Parameter eingesetzt wird.

Nach der Auswertung der simulierten Temperaturdaten und Vergleich mit den Messwerten zeigt sich, dass die Temperatur nicht zufriedenstellend simuliert werden kann. Um dennoch eine Temperaturabhängigkeit zu implementieren, werden die gemessenen Temperaturwerte über den SOC-Verlauf als Look-Up-Table in das Modell eingefügt.

4.9 Gesamtmodell

Das Gesamtmodell beinhaltet alle zuvor beschriebenen Teilmodelle und ist in Abb. 2 zu sehen.

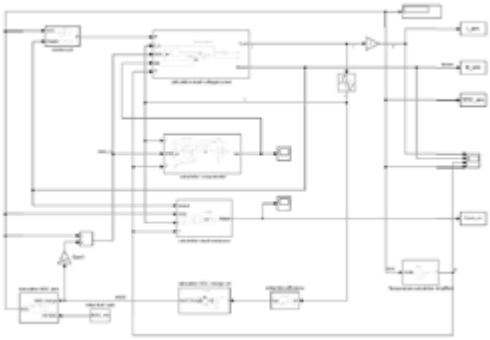


Abb. 2: Gesamtmodell der VRFB

Die im Modell verwendenden Parameter sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Parameter	Wert
alpha_sym	0.5
alpha_therm	$-0.0012\ V/K$
beta_sym	0.5
c	$1.6\ mol$
Cp_elyt	$4200\ J/l \cdot K$
Cp_stack	$4200\ J/l \cdot K$
delta_t	$0.1\ s$
Ea	$8510\ J/mol$
F	$96485\ C/mol$
i_coloumb	$1.2636\ A$
I_init	$0.001\ A$
k0T	Fitting Parameter
max_power	$2000\ W$
N_cell	27
R	$8.3144\ J/mol \cdot K$
R_cell	Fitting Parameter
rho	$1.35\ kg/l$
SOC_max	0.86
SOC_min	0.12
V_tank	$200\ l$
Vp_stack	$5\ l/min$

Tab. 2: Modellparameter

Dabei werden der Innenwiderstand R_{cell} und die Reaktionsrate k_0 bzw. k_{0T} als Fitting Parameter verwendet. Zuerst wird das Gesamtmodell auf Funktion getestet. Es werden Lade- und Entlade-Zyklen simuliert und die Daten verglichen. Beim ersten Versuch wird eine algebraische Schleife detektiert und durch ein Verzögerungsglied aufgelöst.

Da nach den ersten Versuchen die Ergebnisse nicht die gewünschte Qualität liefern, werden die bereits genannten Verbesserungen implementiert, um eine zufriedenstellende Qualität zu erreichen. Mit dem finalen Modell wird der Einfluss der beiden Fitting Parameter analysiert und die Ergebnisse des Modells den Messdaten so gut wie möglich angenähert. Wobei der Widerstandsverlauf für die Bewertung herangezogen wurde. Die Qualität der Näherung wird durch die Korrelation der simulierten Ergebnisse mit den Messwerten definiert, welche mit der Kennzahl R^2 bestimmt wird.

5. ERGEBNISSE

Wie zuvor beschrieben ist das Ziel des Modells, eine gute Beschreibung der Stack Performance über den Widerstand zu erreichen. Zuerst wird der Einfluss der Fitting Parameter auf den Stackwiderstand betrachtet. Durch die Veränderung der Reaktionskonstante k_{0T} kann die Krümmung der Kurve und die Verschiebung in y-Richtung beeinflusst werden. Das kann auch in Abb. 3 beobachtet werden. Über den ohmschen Innenwidertand R_{cell} kann nur die Verschiebung in y-Richtung beeinflusst werden. Diese Veränderung ist in Abb. 4 dargestellt.

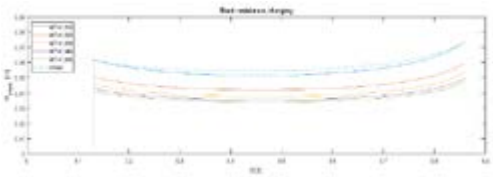


Abb. 3: Einfluss von $\boldsymbol{k_{0T}}$ auf den Stackwiderstand, $\boldsymbol{R_{cell} = 0,8m\Omega = const}$.

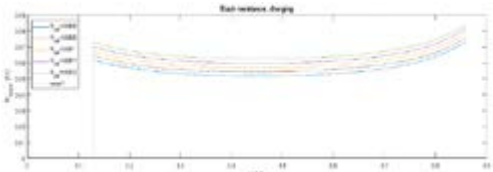


Abb. 4: Einfluss von $\boldsymbol{R_{cell}}$ auf den Stackwiderstand, $\boldsymbol{k_{0T} = 0,013 = const}$.

Durch Verbesserung des Modells und durch Variation der Fittingparameter kann ein Verlauf erzeugt werden, der mit den Messdaten gut vergleichbar ist. Die Ergebnisse für Laden und Entladen werden dabei getrennt voneinander betrachtet. In Abb. 5 ist der Widerstand beim Laden und der Fehler im Vergleich zu den Messdaten zu sehen. Mit diesen Parametern wurde ein Wert von $R^2 = 0{,}969$ erreicht.

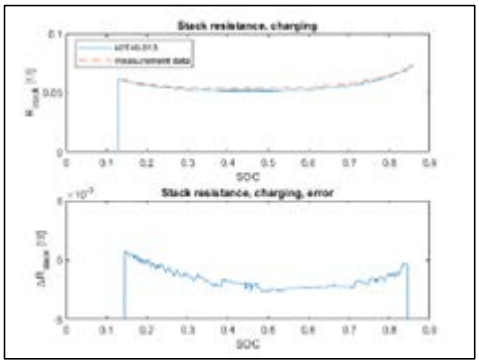


Abb. 5: Stackwiderstand beim Laden verglichen mit den Messdaten $\boldsymbol{k_{0T} = 0,013; R_{cell} = 0,8m\Omega}$

In Abb. 6 ist derselbe Graph für das Entladen zu sehen, hier ist der Wert mit $R^2 = 0{,}0{,}846$ etwas geringer. Das lässt sich darauf zurückführen, dass das die Parameter vor allem mit Daten aus den Ladekurven trainiert wurde. Deshalb ist das Modell für Entladekurven weniger genau.

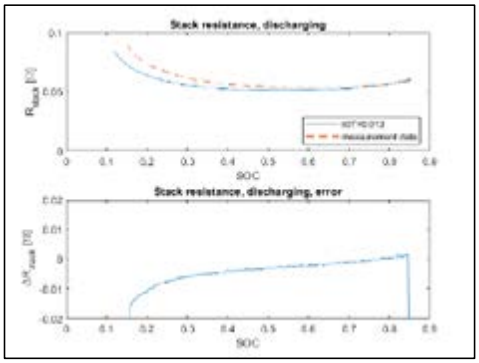


Abb. 6: Stackwiderstand beim Entladen verglichen mit den Messdaten $\boldsymbol{k_{0T} = 0,013; R_{cell} = 0,8m\Omega}$

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wird aus den grundlegenden elektrochemischen Formeln einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie ein mathematisches Modell entwickelt. Damit kann die Performance eines Stacks mithilfe des Stackwiderstands berechnet werden. Die Genauigkeit des ersten Modells wird durch Verbesserungen erhöht. Die simulierten Daten werden mit realen Messdaten verglichen, um das Modell zu validieren. Obwohl keine Temperaturabhängigkeit modelliert werden konnte, kann der Einfluss der Temperatur abgeschätzt werden. Das Modell liefert Ergebnisse mit akzeptabler Qualität. Außerdem kann der Einfluss der Reaktionskonstante k_{0T} und des ohmschen Innenwiderstands R_{cell} auf die Performance gezeigt werden.

In einem nächsten Entwicklungsschritt sollte die Berechnung der Temperaturabhängigkeit implementiert werden. Außerdem sollte das Modell erweitert werden, da hier nur ein Stack beschrieben wird. Für die Berechnung der Performance einer gesamten Batterie sind noch weitere Effekte abzubilden, wie etwa das Zusammenspiel zwischen den Stacks oder das Verhalten bei verschiedenen Durchflüssen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

Aaron, D., Zang, T., Papandrew, A. B. & Zawodzinski, T. A., 2011. Polarization curve analysis of all-vanadium redox flow batteries, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 41, pp. 1175-1182

Bachus, L. & Custodio, A., 2003. *Know and Understand Centrifugal Pumps*, Elsevier, ISBN: 978-1-85617-409-1

Chen, Y.-S., Ho, S.-Y., Chou, H.-W. & Wie, H.-J., 2018. Modeling the effect of shunt current on the charge transfer efficiency of an all-vanadium redox flow battery, *Journal of Power Sources*, Vol. 390, pp. 168-175, ISSN: 0378-7753

Dickinson, J., & Wain, A. J., 2020. The butler-volmer equation in electrochemical theory: Origins, value, and practical application, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 872, pp. 114-145, ISSN: 1572-6657

Fink, H., 2019. Untersuchung von Verlustmechanismen in Vanadium- Flussbatterien, Ph.D. Dissertation, Technische Universität München

He, Q., Li, Z., Zhao, D., Yu, J., Tan, P., Guo, M., Liao, T., Zhao, T. & Ni, M., 2023. A 3d modelling study on all vanadium redox flow battery at various operating temperatures, *Energy*, Vol. 282, pp. 128–934, ISSN: 0360-5442

Huang, Z., Mu, A., Wu, L., Wang, H. & Zhang, Y., 2021. Electrolyte flow optimization and performance metrics analysis of vanadium redox flow battery for large-scale stationary energy storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 63, pp. 31952–31962, ISSN: 0360-3199

Huang, Z., Mu, A., Wu, L., Wang, H. & Zhang, Y., 2023. Attributes and performance analysis of all-vanadium redox flow battery based on a novel flow field design, *Ionics*, Vol. 29, pp. 2793–2803

Knehr, K., & Kumbur, E., 2011. Open circuit voltage of vanadium redox flow batteries: Discrepancy between models and experiments, *Electrochemistry Communications*, Vol. 13, Vo. 4, pp. 342–345, ISSN: 1388-2481

Kim, D. K., Yoon, S. J., Lee, J. & Kim, S., 2018. Parametric study and flow rate optimization of all-vanadium redox flow batteries, *Applied Energy*, Vol. 228, pp. 891–901, ISSN: 0306-2619

König, S., 2017. Model-based design and optimization of vanadium redox flow batteries, Ph.D. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie

Lu, M.-Y., Jiao, Y.-H., Tang, X.-Y., Ye, M., & Xu, Q., 2021. Blocked serpentine flow field with enhanced species transport and improved flow distribution for vanadium redox flow battery," *Journal of Energy Storage*, Vol. 35, pp. 102–284, ISSN: 2352-152X

Pletcher, D. & Walsh, F. C., 1993. *Industrial Electrochemistry*, Springer Dordrecht, ISBN: 978-0-7514-0148-6

Rajan, A. & Yee, S. K., 2022. System dynamics and metrics of an electrochemical refrigerator based on the brayton cycle, *Cell Reports Physical Science*, Vol. 3, No. 3, ISSN: 2666-3864

Reynard, D., Dennison, C., Battistel, A. & Girault, H. H., 2018. Efficiency improvement of an all-vanadium redox flow battery by harvesting lowgrade heat," *Journal of Power Sources*, Vol. 390, pp. 30-37, ISSN: 0378-7753

Sun, Y., Zhao, Z., Yang, M., Jia, D., Pei, W. & Xu, B., 2020. Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 160-173

AUTOR



Florian Gruber

CellCube Energy Storage, IZ NÖ-Süd Straße 3, Objekt M36, +43676843669522, florian.gruber@cellcube.com

2011-2016 HTL Wr. Neustadt Elektrotechnik, 2017-2020 Bachelorstudiengang Mechatronik, FH Wr. Neustadt., ab 2020 Electrical Engineer bei CellCube

ENTWICKLUNG EINES POWER-HIL-SYSTEMS FÜR TESTS EINES ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHER-SYSTEMS

Ing. Stefan Kern, BSc.

***Kurzfassung*:** *Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Firma Knorr-Bremse GmbH ein preiswertes Power-Hardware-in-the-Loop-System mit niedrigen Anforderungen an die Frequenz des Systems entworfen und aufgebaut. Es soll künftig für entwicklungsbegleitende bzw. automatisierte Tests eines Energiespeicher-Systems verwendet werden, indem unter anderem mit ihm Aktuatoren (Magnetschienenbremsen) simuliert werden. Dazu werden als Erstes theoretische Grundlagen zum Thema Hardware-in-the-Loop erarbeitet, anschließend erfolgt die Recherche des passenden Betriebssystems und der geeignetsten Steuerungssoftware. Ubuntu (eine Linux-Distribution) wird als Betriebssystem ausgewählt, die Steuerung des PHIL-Systems wird mit MATLAB bzw. Simulink umgesetzt. Die elektrische Sicherheit des Systems zu gewährleisten ist ein weiterer wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Als Abschluss wird eine Reihe von Versuchen durchgeführt, welche die Leistungsfähigkeit und die Einsetzungsmöglichkeiten des Systems austesten und dokumentieren.*

Schlüsselbegriffe: *Hardware-in-the-Loop, Energiespeicher-System, Hardware-Simulation, entwicklungsbegleitende Tests*

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

In der Bahntechnik gibt es elektrische Energiespeicher-Systeme (ESS), die als Notfall-Energieversorgung fungieren und den Betrieb von Aktuatoren (z.B. Magnetschienenbremsen) auch bei Ausfall des Zug-Bordnetzes gewährleisten sollen. Für entwicklungsbegleitende Tests eines solchen Energiespeicher-Systems soll ein Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL) System zusammen mit der Firma Knorr-Bremse GmbH geplant und aufgebaut werden.

Um die notwendigen Funktionalitäten des PHIL-Systems besser verstehen zu können, wird in Abb.1 ein Überblick über das zu testende Energiespeicher-System gegeben und aufgezeigt, welche seiner Komponenten durch das PHIL-System simuliert werden können:

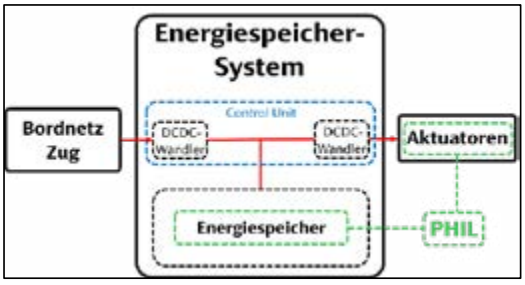


Abb. 1: ESS-Komponenten und Einsatzbereich des PHIL-Systems

Vom Bordnetz des Zuges wird das Energiespeicher-System mit Energie versorgt, sämtliche Prozesse werden von einer zentralen Control Unit gesteuert. Der Eingangs-DCDC-Wandler lädt im Normalbetrieb den Energiespeicher mit der passenden Spannung je nach Ladestand des Speichers. Der Ausgangs-DCDC-Wandler stellt das Spannungsniveau für die an das System angeschlossenen Aktuatoren (Magnetschienen-bremsen) her. Der Hauptbestandteil des ESS ist der Energiespeicher selbst, in ihm wird Energie für den Notfall gespeichert, um sie bei Bedarf den Aktuatoren zur Verfügung zu stellen.

2. HARDWARE-IN-THE-LOOP GRUNDLAGEN

HIL-Techniken sind bereits seit vielen Jahren Stand der Technik, besonders in der Automobil- und Flugzeugbranche aufgrund der dort hohen Systemkomplexität [1][2]. Hardware-in-the-Loop kann rein physische Tests ergänzen, um eine Vielzahl an Vorteilen zu bewirken:

• Verringerte Testkosten: Durch den Einsatz von HIL-Systemen kann die Menge an benötigten Feldversuchen reduziert werden, dadurch wird Geld gespart [3].

• Reduziertes Risiko bei Systemfehlern: Fehlfunktionen bei Systemtests können zu teuren Schäden oder Sicherheitsrisiken führen. Mit HIL-Prüfständen kann ein System vorab in Teilen getestet werden, um unerwartetes oder fehlerhaftes Verhalten ohne größeres Schadenpotential erkennen und künftig verhindern zu können [3].

• Analyse von Fehlerfällen: Mit HIL-Systemen können Fehler absichtlich durch Software erzeugt werden, um Fehlerfälle systematisch durchtesten zu können (dies ist bei rein physischen Systemen eher unpraktisch oder gar nicht möglich) [3].

Hardware-in-the-Loop-Systeme bieten also viele Vorteile und sind in manchen Situationen alternativlos. Zwei Nachteile, die wichtig zu beachten sind, sollen aber nicht unerwähnt bleiben: Es gibt keine Standardlösungen für HIL-Systeme und ihre Errichtung ist zeitaufwändig [4].

2.1. BEGRIFFSDEFINITIONEN

- Hardware-in-the-Loop (HIL): Dieses Verfahren wird für Tests und Validation von Steuergeräten und mechatronischen Komponenten vor deren Inbetriebnahme im Gesamtsystem verwendet [7].

- Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL): Von PHIL spricht man, wenn man die zu testende Hardware mit ihrer vollen Leistung testet (also z.B. den Energiespeicher mit dem Spitzenstrom und der Spitzenspannung, wie sie im Schienenfahrzeug auftritt). Da bei PHIL-Systemen meist ein Verstärker benötigt wird, neigen diese Systeme zu Instabilität bei Regelungen [8]. Folgende Abbildung zeigt ein PHIL-System:

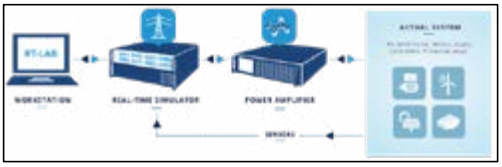


Abb. 2: Beispiel für ein PHIL-System [8]

Innerhalb jedes Zeitschritts muss der HIL-Simulator die anliegenden Eingangssignale verarbeiten, die Modellgleichungen lösen und daraus resultierend Ausgangssignale generieren [9].

Aufgrund der vorhandenen Hardware/Simulationsschnittstelle und damit verschiedener externer Störungen (insbesondere Zeitverzögerungen) sind HIL- und PHIL-Systeme in Bezug auf Stabilität und Genauigkeit empfindlich. Darüber hinaus muss bei PHIL-Systemen die Konfiguration der Leistungsverstärkung und ihre Auswirkungen (I/O-Maximalwerte und Minimalwerte, galvanische Isolierung, Kurzschlussverhalten, Anstiegsrate (slew rate) usw.) berücksichtigt und bewertet werden, da sie die Systemstabilität, die Bandbreite und die erwartete Genauigkeit des Systems stark beeinflusst. Instabilitäten in HIL- und PHIL-Systemen sollten um jeden Preis vermieden werden, da sie Versuche stören und irreparable Schäden an den Geräten verursachen können [10, S.53].

Das Testsystem für das Energiespeicher-System operiert mit den tatsächlichen Leistungen, für die der Energiespeicher ausgelegt ist, es ist also ein Power-HIL-System.

3. ENTWICKLUNGSKONZEPT POWER-HIL-SYSTEM

Das zu entwickelnde PHIL-System soll wie in Abb.1 gezeigt mehrere Testfunktionen abdecken können. Das Energiespeicher-Verhalten beim Verwenden von anderen Akku-Modellen soll vorab getestet werden können, zusätzlich soll es das PHIL-System ermöglichen, den Energiespeicher ohne vorhandene Bremsen bzw. ohne Schienenfahrzeug zu testen. Dabei werden die Magnetschienenbremsen durch Labornetzteile simuliert. Dadurch können so künftig nicht nur Kosten und Aufwand gespart, sondern auch eventuell vorhandene Engpässe an realen Testmöglichkeiten (Funktionstests im Schienenfahrzeug bzw. mit realen Aktuatoren oder Akkus) auf ein Minimum begrenzt werden. Folgende Abbildung zeigt das Entwicklungskonzept des PHIL-Systems:

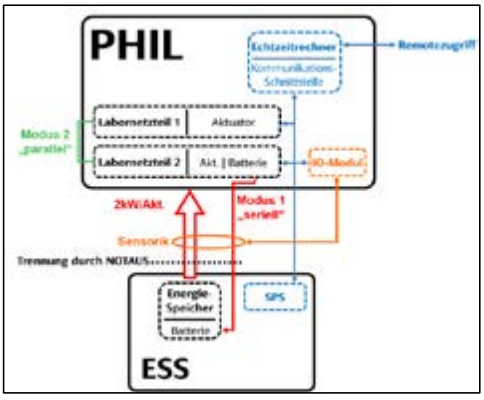


Abb. 3: Entwicklungskonzept Power-HIL-System

Das Herzstück des PHIL-Systems ist ein echtzeitfähiger Rechner, der die restliche Hardware steuert. Über eine Kommunikationsschnittstelle soll der Echtzeitrechner mit den übrigen PHIL-Komponenten, sowie dem zu testenden Energiespeicher-System in Verbindung stehen und Informationen austauschen.

Neben dem Rechner soll das PHIL-System zusätzlich über zwei Labornetzteile verfügen, welche in zwei Modi betrieben werden können. Bei Modus 1 „seriell" wird ein Labornetzteil als Akku betrieben, welcher den Akku im Energiespeichersystem ersetzt (dadurch können alternative Akkumodelle, oder auch andere Energiespeichertypen wie z.B. Brennstoffzellen getestet werden). Aus dem Energiespeicher wird dann vom zweiten Labornetzteil Leistung entnommen, welcher einen Aktuator (Magnetschienenbremse) simuliert. Bei Modus 2 „parallel" simulieren beide Labornetzteile Aktuatoren, so kann die doppelte Spitzenleistung aus dem Energiespeicher abgegriffen werden.

Zur Überwachung der Testprozeduren ist Sensorik geplant (Strom, Spannung und Temperatur), die von einem IO-Modul ausgelesen wird. Die Daten des IO-Moduls werden vom Echtzeitrechner über die Kommunikationsschnittstelle empfangen und berücksichtigt.

Alle Komponenten sollen in einen 19-Zoll-Serverschrank verbaut werden. Im oberen Bereich des Schranks ist ein Monitor mit Maus und Tastatur für die Bedienung des PHIL-Systems geplant. Als Sicherheitseinrichtung ist ein NOTAUS vorgesehen, der beim Drücken alle energieführenden Verbindungen zwischen den Labornetzteilen und dem Energiespeicher-System trennt.

4. ERGEBNISSE

Die Auswahl der Software und des Betriebssystems wurde als Erstes in Angriff genommen. Durch die niedrige Frequenz-Anforderung an das PHIL-System konnten teure Lösungen von externen Firmen (z.B. dSpace, Speedgoat oder National Instruments) als nicht zweckmäßig ausgeschlossen werden. Die Entscheidung fiel auf Linux als Betriebssystem (dieses kann mit dem Preempt-RT Patch in seiner Echtzeitfähigkeit noch weiter verbessert werden) und auf MATLAB bzw. Simulink als Steuerungs-Software.

Ein weiterer zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist das Thema der elektrischen Sicherheit. Um diese beim PHIL-System zu gewährleisten, wurden theoretische Grundlagen zu den Themen Grenzlastintegral, Surges und Selbstinduktion, sowie Absicherung gegen mögliche Überströme und Überspannungen erarbeitet. Diese Theorie mündete in der Auswahl von geeigneten Sicherheits- und Schutzbauteilen (NOT-AUS-Taster und NOT-AUS-Schütz, Leitungsschutzschalter, Sicherungen, Varistoren und TVS-Dioden). Diese Bauteile schützen nicht nur den Bediener bzw. die Bedienerin des PHIL-Systems, sondern auch die teuersten Komponenten des Systems, die beiden Labornetzeile.

Im Zuge der Inbetriebnahme des PHIL-Systems wurde dessen Echtzeitfähigkeit bei unterschiedlichen Scheduling-Modi (Art der Zuweisung von Systemressourcen durch die CPU) verglichen. Wider Erwarten konnte kein nennenswerter Unterschied im zeitlichen Verhalten des PHIL-Systems festgestellt werden, unabhängig davon, welcher Scheduling-Modus ausgewählt wurde. Auch bei einem zweiten Versuch mit

höherer CPU-Auslastung konnte kein Effekt von Echtzeit-Scheduling gemessen werden. Für dieses PHIL-System würde also auch ein herkömmliches Linux-Betriebssystem ohne Echtzeitkernel ausreichen.

Im Anschluss an die Untersuchung der unterschiedlichen Scheduling-Modi wurde gemessen, welche maximale Frequenz mit dem PHIL-System erreicht werden kann. Dazu wurde ein Spannungs-Testsignal von einem MATLAB-Skript aus vorgegeben, dieses mit einem Labornetzteil des PHIL-Systems ausgegeben und mit einem Spannungs Überwachungssensor wieder eingelesen. Die Zeitdifferenz zwischen der Vorgabe der Spannung und dem Eintreffen des Spannungsmesswerts im MATLAB-Skript wurde ausgewertet und damit die maximal mögliche Frequenz von ca. 10Hz ermittelt. Für Simulink wurde die gleiche Messung mit ähnlichem Ergebnis wiederholt.

Dass das PHIL-System mit der geplanten maximalen Stromstärke, Spannung und Leistung betrieben werden kann, wurde im darauffolgenden Test dokumentiert.

Als Abschluss der Inbetriebnahme des PHIL-Systems wurde ein HIL-Versuch durchgeführt, bei dem ein Akku durch eine simulierte Magnetschienenbremse entladen wurde. Die aus dem Akku bezogene elektrische Leistung wurde durch ein Leitungsprofil vorgegeben und vom PHIL-System durch eine Regelschleife erfolgreich nachgestellt. Damit wurde gezeigt, dass das PHIL-System alle geplanten Anforderungen erfüllen kann, das Ziel dieser Arbeit wurde somit erreicht.

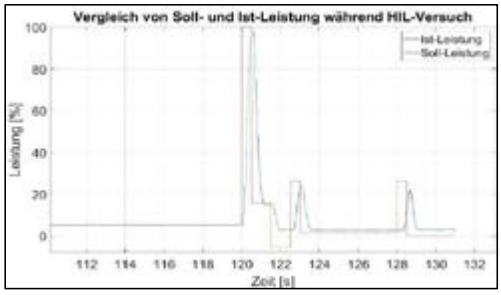


Abb. 4: HIL-Versuch Soll-Leistung mit Ist-Leistung verglichen

Das PHIL-System ist seit seiner Inbetriebnahme konstant im Einsatz. Es eignet sich gut für die schnelle Inbetriebnahme von Teilkomponenten des Energiespeicher-Systems, aber auch längere Tests (z.B. das Aufzeichen der Selbstentladung eines Akkus über 100h) sind einfach und unkompliziert umsetzbar und wurden bereits erfolgreich mit dem System absolviert.

5. AUSBLICK

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte PHIL-System ist eine preiswerte und sichere Ergänzung für den Testbetrieb eines Unternehmens. Die Limitierung der Frequenz auf ca. 10Hz ist die größte Einschränkung des Systems, diese könnte aber durch die Wahl von anderen Kommunikationsschnittstellen (Labornetzteile können bei RS232 Verbindung mit höherer Baudrate als momentan mit USB-Verbindung kommunizieren), oder auch durch ein schnelleres IO-Modul in Zukunft verbessert werden. Wenn dies mit moderatem finanziellem Aufwand umgesetzt werden kann, dann ist ein PHIL-System, wie es im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurde, nicht mehr nur eine Ergänzung zu einem hochperformanten HIL-System von Drittanbietern, sondern in vielen Fällen sogar ein möglicher Ersatz mit weit geringerem Preis.

6. LITERATURVERZEICHNIS

[1] H. Hanselmann, “Hardware-in-the-loop simulation testing and its integration into a cacsd toolset.” in Proceedings of the Computer-Aided Control System Design Symposium, Dearborn, MI, USA, 15–18 September 1996; pp. 152–156.

[2] A. E. Dillard, “Real-time operational evaluations using advanced flight simulators.” in Proceedings of the Digital Avionics Systems Conference, Bellevue, WA, USA, 31 October–7 November 1998; pp. E16-1–E16-8.

[3] George Ellis. Model development and verification. [Website], URL: https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/hardware-in-the-loop. 2012.

[4] F. Mihalič, M. Truntič, and A. Hren, “Hardware-in-the-loop simulations: A historical overview of engineering challenges,” Hardware in the Loop, Real-Time Simulation and Digital Control of Power Electronics and Drives, Volume II, 2022.

[6] MathWorks. Model-based testing. [Website], URL: https://de.mathworks.com/discovery/model-based-testing.html.

[7] Hil – hardware-in-the-loop im maschinen- und anlagenbau. [Dokument], URL: https://www.itwm.fraunhofer.de/content/dam/itwm/de/documents/SYS_Infomaterial/sys_flyer_Hardware%20in%20the%20loop-HIL_DE.pdf.

[8] OPAL-RT Technologies. Power hardware-in-the -loop. [Website], URL: https://www.opal-rt.com/power-hardware-in-the-loop/.

[9] J. Bélanger, P. Venne, and J.-N. Paquin, “The what, where, and why of real-time simulation,” Planet RT, 2010.

[10] T. I. Strasser et al., European Guide to Power System Testing. Springer-Verlag, Cham, Schweiz, 2020.

AUTOR



Ing. Stefan Kern, BSc.

Knorr-Bremse GmbH, Beethovengasse 43-45, 2340 Mödling, stefan.kern@knorr-bremse.com

HTL-Matura Maschinenbau 2018, Bachelor Mechatronik & Mikrosystemtechnik 2022, bei Knorr-Bremse GmbH seit Februar 2023 tätig (zuerst als Werkstudent, jetzt als Testingenieur)

ENTWICKLUNG EINER AUTOMATISIERUNGSZELLE FÜR EINE SPRITZGUSSMASCHINE

Fabian Leser, BSc.

Kurzfassung: *In der Industrie wird es immer schwieriger Personal zu finden, das einfache wiederholende Tätigkeiten ausführt. Bei solchen monotonen Aufgaben, wie das Einlegen von Einlegeteilen in eine Spritzgussmaschine, machen Menschen auch häufig Fehler. Aus diesen Gründen ist das Ziel dieser Arbeit für das Unternehmen Kromberg & Schubert Austria GmbH & Co. KG eine Automatisierungszelle zu entwickeln, die diese Tätigkeit übernimmt, damit keine Fehler auftreten und die Menschen für herausfordernde Arbeiten eingesetzt werden können. In der Automatisierungszelle werden die Einlegeteile über zwei flexible Zuführsysteme vereinzelt und anschließend von einem kollaborativen Roboter in die Spritzgussmaschine eingelegt. Die Automatisierungszelle wird konzipiert, konstruiert und gebaut. Die Roboterbewegungen und die Taktzeiten werden in einer Simulation geprüft. Um die Zelle schließlich betreiben zu können, wird eine Konformitäts-bewertung durchgeführt. Im Betrieb zeigt sich, dass die Automatisierungszelle die geforderten Ansprüche erfüllt.*

Schlüsselwörter: *Automatisierungszelle, kollaborativer Roboter, flexible Teilevereinzelung, Spritzgießen.*

1. EINLEITUNG

In der Zeit des Fachkräftemangels wird es immer schwieriger Produktionspersonal zu finden, insbesondere MitarbeiterInnen, welche einfache, wiederholende Tätigkeiten ausführen [1]. Daher sollten diese Tätigkeiten von Automatisierungszellen übernommen werden und die Menschen herausfordernde Aufgaben ausführen.

Bei einfachen, sich immer wiederholenden Tätigkeiten machen Menschen mit der Zeit Fehler, da sie unkonzentriert werden, weil sie z.B. gelangweilt oder unterfordert sind. Werden die entstandenen Fehler nicht gefunden, kann es zu Störungen bei Produktionsmaschinen, Qualitätseinbußen bei den gefertigten Teilen oder im schlimmsten Fall zu Verletzungen von Menschen kommen. Diese Auswirkungen sind zu vermeiden, indem für solche Tätigkeiten Roboter eingesetzt werden, die den Menschen unterstützen oder ersetzen, sodass die MitarbeiterInnen bei herausfordernden Arbeiten eingesetzt werden können und kein menschliches Potential verschwendet wird [2].

Ziel der Arbeit ist es, für das Unternehmen Kromberg & Schubert Austria GmbH & Co. KG, eine Automatisierungszelle mit einem kollaborativen Roboter und flexiblen Teilevereinzelungen zu entwickeln, die solche monotonen Tätigkeiten übernimmt, vor allem das Einlegen von Einlegeteilen in eine Spritzgussmaschine.

Zunächst wird eine Recherche über die Theorie und den aktuellen Forschungsstand in den Bereichen Spritzgusstechnik, Knickarmroboter, Robotergreifer und Teilezuführungen durchgeführt. Danach wird die Nutzwertanalyse der wichtigsten Komponenten erstellt und die Automatisierungszelle konzipiert und konstruiert sowie die benötigten Teile gefertigt und zusammengebaut. Anschließend wird der Roboter programmiert und die Roboterbewegungen werden unter Berücksichtigung der zu erreichenden Taktzeiten simuliert. Für den Betrieb der Zelle wird schlussendlich die Konformitätsbewertung erstellt.

2. AUFGABENSTELLUNG

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine flexible Automatisierungszelle konstruiert und gebaut werden, die Einlegteile wie Buchsen, Schrauben und Stromschienen positionsgenau auf die Übergabeplatte einer bestehenden Spritzgussmaschine ablegt. Die Zelle soll ein bestehendes Podest, auf dem eine Bedienperson Teile einlegt, ersetzen. Mit der Anlage müssen verschiedene Produkte mit unterschiedlichen Einlegeteilen und verschiedenen Übergabeplatten produziert werden können. Bei den Produkten werden bis zu zwei verschiedene Einlegeteile benötigt, daher sollen diese über zwei flexible Zuführsysteme vereinzelt werden. Es soll eine große Teilevereinzelung verwendet werden, die Einlegeteile von 50 bis $100mm$ verarbeiten kann sowie eine kleinere, für Teile von 5 bis $40mm$. Die flexiblen Zufuhrsysteme sollen direkt über die Robotersteuerung mit dem Roboter kommunizieren. Anschließend sollen die Einlegteile, durch einen kollaborativen Knickarmroboter (Cobot, engl. für Collaborative Robot) mit flexiblem Greifsystem, lagerichtig auf die Dorne bzw. in die Bohrungen der Übergabeplatte positioniert werden. Der Cobot soll eine Reichweite $r \geq 1100mm$, eine Traglast $m \geq 10kg$ und eine Geschwindigkeit $v \geq 1000mm/s$ aufweisen. Der Robotergreifer soll einfach vom Roboter angesteuert werden können und einen Hub $h \geq 60mm$ haben, um das kleinste und größte Einlegteil greifen zu können.

3. STAND DER TECHNIK

Spritzgießen: Das Spritzgießen, ein Verfahren der Urformtechnik, ist gegenwärtig die meistgenutzte Verarbeitungsmethode von Kunststoffen in der Industrie. Mit diesem Verfahren werden Formteile mit komplexer Geometrie vollautomatisch hergestellt. Der Werkstoff wird in der Spritzgussmaschine verflüssigt und in eine Form, das Spritzgusswerkzeug, unter hohem Druck eingespritzt, dort verdichtet, abgekühlt und anschließend wird das gefertigte Spritzgussteil aus dem Werkzeug ausgeworfen [3].

Knickarmroboter: Knickarmroboter sind die meistgenutzte Roboterart und werden in der Industrie als programmierbare Maschine für Handhabungsaufgaben, Montageaufgaben oder für die Bearbeitung von Werkstücken eingesetzt. Ein Knickarmroboter besteht aus der Kinematik (Roboterarm), der Steuerung (Roboterkontroller), und einem Handbediengerät. Zusätzlich wird je nach Anwendung ein Endeffektor (Greifer, Werkzeug usw.) benötigt [4].

Bei Knickarmrobotern kann zwischen Industrierobotern und kollaborativen Robotern unterschieden werden, je nachdem

wie sie mit der Umgebung zusammenarbeiten. Industrieroboter werden in einer Schutzeinhausung verbaut, um die Menschen nicht zu gefährden. Kollaborative Roboter hingegen können mit Menschen zusammenarbeiten und sind daher in ihrem Einsatzgebiet flexibel [4].

Teilevereinzelungen: Durch Teilevereinzelungen werden Werkstücke aus loser Schüttung getrennt und ausgerichtet, damit sie weiterverarbeitet werden können. Die ausgerichteten Werkstücke können vom Endeffektor des Roboters mit der immer gleichen Orientierung entnommen werden [5].

In der Industrie werden am häufigsten Vibrations-Wendelförderer zum Vereinzeln von kleinen, nichtorientierten Bauteilen eingesetzt. Das System beruht auf einem für jedes Bauteil angepassten Topf, in dem die Teile durch einen Vibrationsantrieb, den Wendeln entlang, nach oben gefördert und dabei ausgerichtet werden [6].

Eine weitere Möglichkeit der Teilevereinzelung ist die flexible Vereinzelung. Durch gezielte Vibrationen des Rütteltisches können die Bauteile in die gewünschte Orientierung gebracht werden. Über ein stationär montiertes 2D Vision System wird die Position der Bauteile zum Roboter weitergegeben, sodass dieser die Bauteile greifen kann. Der Vorteil liegt darin, dass bei einem Produktwechsel mechanisch nichts an der flexiblen Vereinzelung verändert werden muss [7].

3.1. FORSCHUNGSSTAND

Bakr *et al*. [8] nutzen das Spritzgießen zur Einbettung von elektronischen Schaltungen in Kunststoff. Es wird dabei untersucht, wie der Spritzgussprozess und die elektronischen Komponenten beschaffen sein müssen, um die Elektronik nicht zu beschädigen und eine gute Haftung zwischen Kunststoff und den Schaltkreisfolien herzustellen. Nach mehreren Versuchen mit unterschiedlichen Parametern kann eine einwandfrei Funktion der eingebetteten Elektronik durch eine Messung bestätigt werden.

Für den kooperativen Einsatz von Robotern entwickeln Horatiu *et al*. [9] eine Lösung, bei der zwei Roboter miteinander zusammenarbeiten, um einen Arbeitsbereich zu schaffen in dem keine Bedienung durch Menschen erforderlich ist. Ein kollaborativer Roboter führt dabei die benötigten Aufgaben aus und wird von einem mobilen Roboter mit Werkzeug und Material versorgt. Der mobile Roboter wechselt auch das Werkzeug des Cobots automatisch, wodurch ein flexibler Einsatz dieses Systems in der Industrie möglich ist.

Im Bereich der Teilezuführungen werden zahlreiche Forschungsprojekte und Experimente durchgeführt. Mathiesen *at al.* [10] benutzen einen Cobot, der mit Schaufeln ausgestattet ist, um Schüttgut flexibel zu vereinzeln. Die zu vereinzelnden Teile befinden sich sortenrein in Behältern, von dort werden sie mit den für jedes Teil entwickelten Schaufeln über den Cobot entnommen. Die Schaufel wird geschüttelt, damit sich die Teile in die gewünschte Orientierung ausrichten. Die ausgerichteten Teile können anschließend durch einen zweiten Roboter entnommen werden, die restlichen Teile können mit der Schaufel im Regal gelagert werden und ein anderes Teil kann mit der entsprechenden Schaufel vereinzelt werden. Die Vereinzelung von einem Teil benötigt im Durchschnitt $t = 8{,}6s$.

Ein anderes Konzept benutzen Le und Lin [11] für den Griff in die Kiste von Verpackungen von USB-Sticks. Im Gegensatz zu anderen Lösungen, bei denen 3D-Informationen genutzt werden, werden hier 2D-Bilddaten benutzt. Aus den Bildern wird mittels Deep-Learning die Lokalisierung des Zielobjekts durchgeführt. Die Ergebnisse des Versuches zeigen, dass bei der vorhersage der 3D-Positionen der durchschnittliche Lagefehler bei $\Delta l = 2{,}3mm$ und Winkelfehler bei $\Delta w = 2{,}26°$ liegt. Die Erfolgsquote beträgt $p > 99\%$, bei einer durchschnittlichen Bildverarbeitungszeit $t_b = 0{,}9s$.

Lin, Liang und Chen [12] nutzen für den Griff in die Kiste die 3D-Informationen von zwei RGB-D Kameras und vergleichen diese mit vorhandenen CAD-Modellen. Durch dieses Verfahren können beliebige Objekte erkannt werden und müssen nicht, wie in [11], planare Flächen aufweisen. Um diese Methode zu testen, wird ein Experiment durchgeführt: Es stellt sich heraus, dass der durchschnittliche Lagefehler $\Delta l = 0{,}98mm$ und der Winkelfehler $\Delta w = 2{,}13°$ beträgt. Die Aufnahme der 3D-Bilder mit der Verarbeitung benötigt im Durchschnitt $t_b = 6{,}19s$.

Ein Knickarmroboter mit sechs Achsen wird von Koo *et al.* [13] für den Griff in die Kiste genutzt. Zum Erkennen der Teile ist eine RGB-D Kamera am Roboterarm befestigt. Die Position der zu greifenden Teile wird durch ein Neuronales Netz bestimmt. Dabei werden die CAD-Daten der Teile in verschiedenen Orientierungen gerendert und mit diesen Bildern das Neuronale Netz trainiert. Durch diese Methode ist der Einstellaufwand durch Menschen gering. Beim Testen beträgt der durchschnittliche Lagefehler $\Delta l = 3{,}97mm$ und der Winkelfehler $\Delta w = 2{,}74°$. Die Zeit für die Bildaufnahme und -verarbeitung beträgt $t_b = 1{,}56s$. Der Griff in die Kiste zeigte beim ersten Versuch eine Erfolgsrate von $p = 65\%$, beim zweiten Versuch $p = 100\%$, bei einer durchschnittlichen Zykluszeit von $t = 32{,}53s$ mit der Roboterbewegung.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Als erstes wird die Nutzwertanalyse für alle Hauptkomponenten der Automatisierungszelle durchgeführt. Danach wird das Konzept und die Konstruktion erstellt. In einer Simulation werden die Roboterbewegungen simuliert und Taktzeiten geprüft und schließlich eine Konformitätsbewertung durchgeführt.

Nutzwertanalyse: Um die technisch am besten geeigneten Komponenten zu verbauen, werden alle zugekauften Hauptkomponenten, wie der Roboter, der Robotergreifer und die flexible Zuführung einer Nutzwertanalyse unterzogen. Für jede Komponente werden Bewertungskriterien festgelegt und diese im paarweisen Vergleich gewichtet. Pro Bewertungskriterium werden für jede Alternative Punkte vergeben und diese dann mit der jeweiligen Gewichtung multipliziert. Diese Bewertungszahlen werden anschließend addiert. Die Alternative mit der höchsten Gesamt-bewertungszahl weist die beste technische Eignung auf, siehe Methode nach [14].

Als Roboter wird der Typ CRX-10iA/L der Firma FANUC, als Robotergreifer der Typ EGK-40-MB-M-B der Firma SCHUNK und als flexible Vereinzelungen werden die Typen ASYCUBE 530 und 240 der Firma ASYRIL gewählt und in der Automatisierungszelle verbaut.

Konzeption und Konstruktion: Nach der Auswahl der Hauptkomponenten, in der Nutzwertanalyse, wird die Automatisierungszelle konstruiert und das elektrische Konzept festgelegt. Nach Fertigstellung der Konstruktion erfolgt die

Bestellung sowie Fertigung der Einzelteile und der Aufbau der Automatisierungszelle. Im Zuge der Konstruktion werden die Roboterabläufe simuliert, um die Funktion sicher zu stellen. Auch die Risikobeurteilung wird während der Konstruktion begonnen, damit eine sichere Automatisierungszelle konstruiert werden kann. Die gesamte Automatisierungszelle wird im CAD-Programm SIEMENS NX gezeichnet.

Das Grundgestell wird als Schweißkonstruktion aus Stahlbauhohlprofilen gebildet. Darauf wird der Roboter mit dem Robotergreifer verschraubt und die beiden Vereinzelungen über Schwingungsdämpfer befestigt. Der Schutzverbau wird aus Strebenprofilen, Schutzscheiben aus Acrylglas und einem Lichtgitter gefertigt und auf dem Grundgestell verschraubt. Die gesamte Zelle wird über Zentrierungen, die als Konusse ausgeführt sind, vor der Spritzgussmaschine ausgerichtet. Dadurch wird sichergestellt, dass immer die gleiche Position zur Übergabeplatte, auf der die Einlegeteile abgelegt werden, gegeben ist. Für einen flexiblen Einsatz kann die Automatisierungszelle mit einem Palettenhubwagen transportiert werden. Die konstruierte Zelle ist in Abb.1 dargestellt.

Programmierung und Simulation: Schon während der Konstruktion der Automatisierungszelle wird mit der Programmierung und der Simulation der Roboterbewegungen begonnen. Dadurch kann die konstruierte Zelle, bereits vor dem Fertigen der Bauteile, auf die gewollte Funktion überprüft werden. Für die Programmierung wird zuerst ein Programmablaufplan ausgearbeitet und aus diesem das Roboterprogramm erstellt. Mit den CAD-Daten und dem Roboterprogramm wird eine Simulation in FANUC ROBOGUIDE durchgeführt. Dabei wird geprüft, ob die Roboterbewegungen in der konstruierten Zelle möglich sind und ob die von der Spritzgussmaschine vorgegebenen Zykluszeiten eingehalten werden. Die Taktzeit wird für drei Produkte geprüft, dabei stellt sich bei zwei Produktion heraus, dass genügend Zeitreserven vorhanden sind. Beim dritten Produkt wird die Zykluszeit durch Verändern des Roboterablaufs optimiert. Anschließend werden die simulierten Taktzeiten mit den gemessenen Taktzeiten des realen Roboters verglichen. Es stellt sich heraus, dass die simulierten und realen Taktzeiten, bis auf geringe Abweichungen, übereinstimmen.

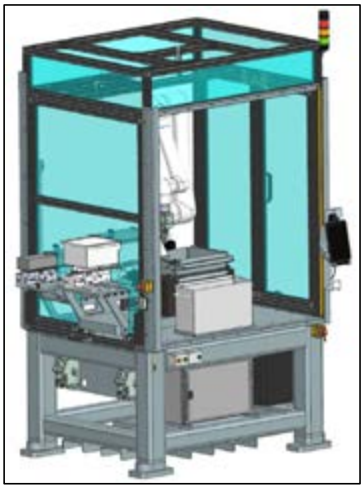


Abb.1: Konstruktion der Automatisierungszelle

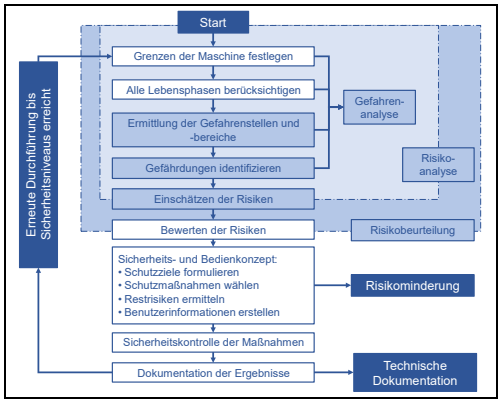


Abb.2: Ablauf einer Konformitätsbewertung [15]

Konformitätsbewertung: Nach der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG ist die entwickelte Automatisierungszelle eine Maschine. Um diese als Unternehmen betreiben zu dürfen, muss eine EG-Konformitätsbewertung (EG: Europäische Gemeinschaft) vorliegen. Deshalb wird begleitend zur Konstruktion gemeinsam mit einem Ingenieurbüro eine Risikobeurteilung mit Risikominderung durchgeführt und eine technische Dokumentation verfasst. Es müssen dabei einige Gesetze, Richtlinien und Normen eingehalten werden. Danach kann die EG-Konformitätserklärung erstellt werden und das CE-Zeichen am Typenschild angebracht werden. In Abb.2 ist der Ablauf der Konformitätsbewertung dargestellt [15].

Bei der Risikominimierung wird das Risko des Quetschens im Entnahmebereich zwischen Robotergreifer und Rütteltisch bzw. Einlegeteil durch Reduktion der Druckkraft des Roboters gemindert. Dadurch kann die CE-Konformität für die Automatisierungszelle ausgestellt werden.

5. ERGEBNISSE

Es wurden drei Produkte erfolgreich in Betrieb genommen. Dabei stellte sich eine sehr gute Funktion der gesamten Zelle heraus, was auf ein gelungenes Konzept eine erfolgreiche Konstruktion und Programmierung sowie einen guten Aufbau schließen lässt.

Die beiden Teilevereinzelungen Typ ASYCUBE 530 und Typ ASYCUBE 240 der Firma ASYRIL arbeiten zuverlässig und präzise mit dem dazu gehörigen EYE+ Kamerasystem. Die Anbindung dieser an die Robotersteuerung ist problemlos möglich.

Der Cobot Typ CRX-10iA/L der Firma FANUC führt die Bewegungen sehr genau und gleichförmig aus. Die Entnahme aus den Rütteltischen funktioniert hervorragend, auch die Ablage auf den Aufnahmedornen und Bohrungen, bei der eine Toleranz $\Delta t = \pm 0{,}2mm$ eingehalten werden muss, gelingt sehr präzise und ohne Störungen, was auf die hohe Wiederholgenauigkeit des Roboters zurückzuführen ist.

Der Geifer Typ EGK-40-MB-M-B der Firma SCHUNK ist einfach mit dem Roboter zu steuern, die Verbindung über die interne Verkabelung des Roboterarms gestaltet sich problemlos. Die Bewegung der Greifbacken und das Erkennen der gegriffenen Teile funktioniert gut. Einzig die Schließbewegung könnte etwas schneller sein.

Die Kommunikation zur Spritzgussmaschine Typ VICTORY 120 der Firma ENGEL bereitete zu Beginn Probleme, da das automatische Quittieren des Lichtgitters der Halbautomatisierung nicht funktionierte. Mit Hilfe eines Servicetechnikers der Firma ENGEL konnte dieses Problem gelöst werden und anschließend funktionierte die Kommunikation wie gewollt.

Durch die Verwendung der Automatisierungszelle, anstelle der Bedienperson, erhöht sich die Effizienz der gesamten Anlage, da keine Störungen durch falsch eingelegte Teile oder durch nicht erlaubtes Unterbrechen des Lichtgitters auftreten.

Im Vergleich zum vorgestellten Forschungsstand, siehe Kap.3.1, kann die Automatisierungszelle mit den erreichten Ergebnissen gut mithalten. Bei der Gesamtentnahmezeit $t = 5{,}30s$ ist sie die schnellste Lösung, der durchschnittliche Lagefehler liegt bei $\Delta l = 1{,}05mm$ und Winkelfehler bei $\Delta w = 1{,}1°$. Die Erfolgsquote beträgt $p > 99\%$, bei einer durchschnittlichen Bildverarbeitungszeit $t_b = 1{,}5s$.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Automatisierungszelle , siehe Abb.3, entwickelt und gebaut, die es ermöglicht, Einlegteile zu Vereinzeln und auf den Drehtisch einer bestehenden Spritzgussmaschine abzulegen. Dazu wurden die am besten geeigneten Komponenten, durch eine Nutzwertanalyse, ermittelt. Die Automatisierungszelle wurde mit den ausgewählten Komponenten konstruiert. Schon während der Konstruktionsphase wurde die Konformitäts-bewertung durchgeführt, um eine sichere und EG-konforme Maschine zu entwickeln. Die Programmierung des Roboters wurde in FANUC ROBOGUIDE durchgeführt, wo anschließend die Funktion der Automatisierungszelle, durch eine Simulation der Roboterbewegungen, geprüft wurde. Nach einer Optimierung des Programmablaufes konnten die vorgegebenen Taktzeiten eingehalten werden. Nachdem die einwandfreie Funktion der Zelle in der Simulation gegeben war, wurden die konstruierten Bauteile bestellt, gefertigt und anschließend zur Automatisierungszelle zusammengesetzt. Die Konformitäts-bewertung wurde an der gebauten Zelle fertiggestellt, dabei wurden bei der Risikominderung die Restrisiken auf ein vertretbares Maß reduziert. Nach der Behebung von kleineren Problemen, wurden die Produkte in Betrieb genommen, dabei stellte sich eine gute Effektivität der Anlage heraus. Der verbaute Roboter arbeitet sehr genau und auch die Teilevereinzelungen mit den Kamerasystemen funktionieren zuverlässig.

6.1. AUSBLICK

Obwohl die Automatisierungszelle die gestellten Erwartungen erfüllt, können Details verbessert werden.

Mit der Automatisierungszelle werden hauptsächlich zylindrische Einlegeteile, wie Schrauben und Buchsen verarbeitet. Für diese Teile würde ein Dreibackengreifer genauer greifen und auch weniger Bauraum in Anspruch nehmen als der verwendete Parallelgreifer. Es müsste dazu ein Schnellwechsler am Handflansch des Roboters angebracht werden, damit einfach und werkzeuglos ein Greiferwechsel möglich ist.

Um die Taktzeit zu verkürzen, könnten zwei Greifer am Roboter angebracht werden, um bei jeder Einlegebewegung zwei Einlegteile auf die Übergabeplatte bringen zu können und somit Roboterbewegungen einsparen zu können. Durch die Verwendung von zwei Greifern wird jedoch die Entnahme und Ablage der Teile komplizierter, da zwei Greifer mehr Bauraum benötigen.

Die Entnahme der Einlegeteile von der Übergabeplatte durch den ENGEL Portalroboter verursacht bei manchen Produkten Störungen. Dann bleiben Einlegeteile auf der Übergabeplatte zurück und diese müssen beim Beheben der Störung manuell entnommen werden. Durch eine Kamera über der Übergabeplatte könnte vor dem Einlegevorgang des Cobots geprüft werden, ob alle Einlegeteile durch den Portalroboter entnommen wurden. Sollten sich noch Einlegeteile aufgrund einer Störung auf der Platte befinden, wird nur auf die freien Dorne eingelegt und es müssen manuell keine Teile entnommen werden.



Abb.3: Realisierte Automatisierungszelle

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Agenda Austria, "Der Arbeitskräftemangel steht erst am Anfang." Agenda-austria.at. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agenda-austria.at/grafiken/der-arbeitskraeftemangel-steht-erst-am-anfang/. [Zugegriffen am: November 16, 2023].

[2] A. Botthof, E. Hartmann, "Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0." Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014.

[3] C. Bonten, "Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen." 2.Aufl. München, Hanser, 2016.

[4] B. Siciliano, O. Khatib, "Springer Handbook of Robotics." 2.Aufl. Berlin, Springer, 2016.

[5] A. Pott, T. Dietz, "Industrielle Robotersysteme: Entscheiderwissen für die Planung und Umsetzung wirtschaftlicher Roboterlösungen." Wiesbaden, DE: Springer Vieweg, 2019.

[6] G. Boothroyd, "Assembly Automation and Product Design." 2.Aufl. Florida, CRC Press, 2005.

[7] A. A. Malik, M. V. Andersen, A. Bilberg, "Advances in Machine Vision for Flexible Feeding of Assembly Parts." 29th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, S. 1228-1235 Jun. 2019. doi: 10.1016/01214.

[8] M. Bakr et al., "Effect of Overmolding Process on the Integrity of Electronic Circuits." 22nd European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition (EMPC), S. 1-8, Sept. 2019. doi: 10.23919/EMPC44848.2019.8951797.

[9] R. Horatiu et al., "Collaborative Application Between Robots for Industrial Environments." International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), S. 1-4, Mai 2021. doi: 10.1109/ICATE49685.2021.9464979.

[10] S. Mathiesen, I. Iturrate, A. Kramberger, "Vision-Less Bin-Picking for Small Parts Feeding." 15th International Conference on Automation Science and Engineering, S. 1657-1663, Sept. 2019. doi: 10.1109/843203.

[11] T. -T. Le, C. -Y. Lin, "Bin-Picking for Planar Objects Based on a Deep Learning Network: A Case Study of USB Packs." Sensors, no. 16, Aug. 2019. doi: 10.3390/s19163602.

[12] H. -Y. Lin, S. -C. Liang, Y. -K. Chen, "Robotic Grasping With Multi-View Image Acquisition and Model-Based Pose Estimation." IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 10, S. 11870-11878, Mai 2021. doi: 10.1109/JSEN.2020.3030791.

[13] S. Koo et al., "Robolink Feeder: Reconfigurable Bin-Picking and Feeding with a Lightweight Cable-Driven Manipulator." 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), S. 41-48, Aug. 2017. doi: 10.1109/COASE.2017.8256073.

[14] J. Kühnapfel, "Scoring und Nutzwertanalysen." Wiesbaden, Springer Gabler, 2021.

[15] RL 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), ABl L 157, 24-86. 2006.

AUTOR



Fabian Leser, BSc.

Kromberg & Schubert Austria GmbH & Co. KG
Ungargasse 111, 7350 Oberpullendorf, fabian.leser@ksa.kroschu.com

HTL-Matura Mechatronik an der HTL Eisenstadt 2018, Bachelor Mechatronik & Mikrosystemtechnik an der FH Wiener Neustadt 2022, Automatisierungstechniker bei Kromberg & Schubert Austria GmbH & Co. KG seit 2022, Master Mechatronik an der FH Wiener Neustadt 2024

OPTISCHE ANALYSE DES STARTSPRUNGES BEIM SCHWIMMSPORT MIT HILFE AUTOMATISCHER MARKER ERKENNUNG

Chunping Li, BSc.

Kurzfassung: *Der Schwimmsport verkörpert eine faszinierende Symbiose aus Technik, Ausdauer und Präzision. Insbesondere bei Kurzstreckenwettkämpfen ist der Startsprung ein entscheidender Faktor, der maßgeblich die Gesamtzeit beeinflusst. Diese Masterarbeit ist eine Grundlage um, den Startsprung im Schwimmsport eingehend zu analysieren. Ein System zur Messung der Sprungkräfte ist derzeit einsatzbereit und bildet die Grundlage für diese Untersuchung. Um jedoch ein umfassendes Verständnis des Startsprungs zu erlangen, wird dieses System um eine optische Analyse der Sprung- und Tauchphasen erweitert. Fortschrittliche Technologien und innovative Ansätze im Bereich der Sensorfusion und Künstlichen Intelligenz (KI) bieten neue Perspektiven in der Auswertung von Optischen Analysen. Besonders die automatisierte Erkennung von aktiven Marken steht im Zentrum dieser Arbeit, weil sie eine präzise Bestimmung von Bewegungsprofilen erlaubt, und so die Basis für eine nachfolgende Optimierung liefert.*
Schlüsselwörter: *Erkennungsalgorthimen; Sensorfusion; KI-Marker Detektion; Opthische Analyse; Schwimmsport*

1. EINLEITUNG

Der Schwimmsport vereint Technik, Ausdauer und Präzision und stellt hohe Anforderungen an die Athleten. Besonders der Startsprung hat im Kurzstreckenbereich einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtzeit eines Wettkampfs.[1] Fortschritte in Technologien wie Sensorfusion, Computer Vision (CV) und Künstlicher Intelligenz (KI) eröffnen neue Möglichkeiten, die Leistungsfähigkeit von Schwimmsportlern zu optimieren.

Frühe Ansätze in der CV-Technologie nutzten klassische Bildverarbeitungstechniken wie Kantendetektion, um grundlegende Bewegungsanalysen zu ermöglichen.[2] Mit der Entwicklung tiefer neuronaler Netze, insbesondere Convolutional Neural Networks (CNNs), können komplexe Muster erkannt und die Genauigkeit der Analysen deutlich gesteigert werden. Algorithmen wie YOLO (You Only Look Once) ermöglichen dabei eine präzise und effiziente Objekterkennung in Echtzeit.[3] Diese Fortschritte finden zunehmend Anwendung im Schwimmsport, insbesondere in der Analyse von Start- und Tauchphasen.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Kombination von klassischen Bildverarbeitungsmethoden und modernen CV-Algorithmen eine präzise und effiziente Lösung für die Analyse von Startsprung-Trajektorien zu entwickeln. Dabei werden spezifische Herausforderungen wie Reflexionen, Bewegungsunschärfen und dynamische Markerbewegungen adressiert. Klassische Techniken wie der Sobel-Operator zur Merkmalsextraktion und moderne Algorithmen wie ein optimiertes Yolov2-Modell werden kombiniert, um eine robuste Markerkennung und Bewegungsanalyse zu ermöglichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit bieten eine solide Grundlage für zukünftige Entwicklungen, wie automatisierte Analysesysteme oder personalisierte Optimierungshilfen. Diese Ansätze können nicht nur im Schwimmsport, sondern auch in anderen Bereichen, wie z. B. der Analyse von Sportbewegungen oder der Rehabilitation, Anwendung finden.

2. MARKERERKENNUNG

Die präzise Analyse von Bewegungen spielt im Schwimmsport eine zentrale Rolle für die Optimierung der Leistung. Besonders der Startsprung und die anschließende Tauchphase haben einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtzeit eines Wettkampfs. Bestehende Systeme konzentrieren sich häufig auf einzelne Aspekte, wie die Messung von Sprungkräften oder die optische Analyse von Bewegungen, bieten jedoch keine umfassende Lösung für die präzise Verfolgung und Analyse komplexer Bewegungsabläufe.

Ein zentrales Problem besteht in der zuverlässigen Erkennung und Verfolgung von Markern, die zur Analyse der Schwimmerbewegungen eingesetzt werden. Herausforderungen wie Marker-Verdeckungen, Reflexionen auf der Wasseroberfläche oder Bewegungsunschärfen erschweren die Verfolgung erheblich. Ansätze, die ausschließlich auf klassischer Bildverarbeitung oder KI-basierten Methoden beruhen, stoßen dabei oft an ihre Grenzen: Klassische Bildverarbeitung liefert in stabilen Umgebungen zwar konstante Ergebnisse, zeigt jedoch Schwächen bei komplexen Szenarien. KI-basierte Ansätze sind flexibler, erfordern jedoch hohe Hardware-Ressourcen und können bei wechselnden Lichtverhältnissen instabil sein.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Lösung, die Marker während der Start- und Tauchphase zuverlässig verfolgt und Bewegungen präzise analysiert. Hierfür wird eine Kombination aus klassischer Bildverarbeitung und KI-Algorithmen eingesetzt, um die Stärken beider Ansätze zu vereinen und deren Schwächen zu kompensieren. Die Aufgabenstellung umfasst folgende Schritte:

Markererkennung mit klassischer Bildverarbeitung:
Implementierung eines Ansatzes auf Basis klassischer Bildverarbeitung, wie Kantendetektion (z. B. Sobel-Operator) und Helligkeitsfilterung, zur Verfolgung der Marker und zur Erstellung von Bewegungsbahnen.

Markererkennung basierend auf KI-Algorithmen:
Einsatz eines auf dem Yolo-Modell basierenden Objekterkennungsalgorithmus zur zuverlässigen Markererkennung, insbesondere zur Verbesserung der Robustheit gegenüber Herausforderungen wie Wasserreflexionen, Verdeckungen und Bewegungsunschärfen.

Kombination beider Methoden:
Entwicklung einer Hybrid-Bildverarbeitungsmethode, die klassische Bildverarbeitung und KI-Algorithmen kombiniert, um die Präzision der Markererkennung zu erhöhen und gleichzeitig

die Erstellung konsistenter und glatter Bewegungstrajektorien zu gewährleisten.

Analyse und Vergleich:
Untersuchung der Leistungsfähigkeit der einzelnen Methoden sowie der kombinierten Methode hinsichtlich Präzision, Robustheit und Effizienz.

3. ANALYSEMETHODEN

Für die Durchführung der Arbeit werden folgende Systeme eingesetzt:

Messung von Sprungkräften
Ein bestehendes System zur präzisen Erfassung der Sprungkräfte während des Startsprungs.

Hochauflösende Kameras
Vier Kameras mit einer Auflösung von 1080P und einer Bildrate von 60 fps, am Rand des Schwimmbeckens positioniert, um die Start- und Tauchphase aus vollständig zu erfassen.

Marker
LED Marker, die an definierten Körperstellen (z.B. Schulter, Hüfte) der Schwimmer: innen angebracht werden. Die LEDs dienten als aktive Lichtquellen, um die Verfolgung und Analyse der Bewegungen zu erleichtern, insbesondere in Umgebungen mit suboptimalen Lichtverhältnissen.

Software für klassische und KI-Algorithmen
Matlab wird sowohl für die Implementierung klassischer Bildverarbeitungsmethoden als auch für die Entwicklung und Optimierung von KI-Algorithmen Markererkennung verwendet.

In dieser Arbeit werden klassische Bildverarbeitung und KI-Algorithmen Bildverarbeitung verwendet und kombiniert, um Marker während des Schwimmstarts präzise zu erkennen und zu verfolgen.

Klassische Bildverarbeitung zur Markererkennung
Für die Markerkennung und Bewegungsverfolgung wird ein klassisches Bildverarbeitungsprogramm entwickelt. Die Bilder werden vorverarbeitet, indem ein Gaußscher Filter zur Rauschreduzierung und ein Bildvergleich zur Bewegungserkennung eingesetzt werden. Mittels Schwellenwertsegmentierung werden relevante lokale Bildbereiche extrahiert und anhand von Größe, Position und Farbmerkmalen gefiltert.[4] Anschließend werden die Marker verfolgt und ihre Trajektorien durch Verknüpfung der Schwerpunkte erstellt. Zur Glättung der Trajektorien wird eine Interpolation durchgeführt. Die Ergebnisse werden in einem neuen Video visualisiert und gespeichert.

KI-Algorithmus zu Markererkennung
Für die Markerkennung wird ein Yolov4-Modell verwendet, das auf dem vortrainierten „Tiny-Yolov4-coco"-Modell basiert. Dieses Modell wird durch spezifisches Training mit angepassten Daten auf die Aufgabe der Markerkennung abgestimmt.[5] Die Anpassungen umfassen die Definition neuer Klassen, die Festlegung geeigneter Ankerboxen basierend auf den Trainingsdaten sowie die Optimierung der Netzwerkparameter. Die Trainingsdaten bestehen aus Bildern mit annotierten Markern in Form von Bounding Boxes, die in Trainings- und Validierungsdatensätze aufgeteilt werden. Zur Verbesserung der Robustheit des Modells werden verschiedene Datenaugmentierungstechniken wie zufälliges Spiegeln, des Trainings wird das Modell gespeichert und in den Analysen verwendet.

Zusätzlich wird ein Yolov2-Modell implementiert, um die Machbarkeit und die Leistungsfähigkeit eines einfacheren Modells in diesem Kontext zu evaluieren. Dieses Modell basiert auf einem vortrainierten ResNet-18-Netzwerk, das an die Yolov2-Architektur angepasst wird.[6] Die Implementierung dient in erster Linie als theoretische Validierung und Vorbereitung für die spätere Entwicklung eines eigenen Yolov2-Modells. Durch diese Validierung können die grundlegenden Anforderungen an die Netzwerkarchitektur, wie Trainingszeiten, Effizienz und Genauigkeit, analysiert und für die Eigenentwicklung berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Yolov2-Implementierung zeigen, dass ein einfaches Modell mit optimierten Parametern und Datenaugmentierung unter spezifischen Bedingungen eine vergleichbare Erkennungsleistung wie Yolov4 erzielen kann. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die spätere Entwicklung eines eigenen Yolov2-Modells, das speziell für hardwarebeschränkte Umgebungen sowie für eine höhere Effizienz bei der Erkennung und dem Training optimiert wird.

Entwicklung eines eigenen Yolov2-Netzwerks
Zur weiteren Verbesserung der Markererkennung und Bewegungsverfolgung wird ein eigenes Yolov2-Modell entwickelt und trainiert. Dafür wird ein schlanker, auf die spezifischen Anforderungen der Markerkennung abgestimmter Layergraph erstellt, der die Netzwerkarchitektur an die Aufgabenstellung anpasst.

Die Trainingsdaten bestanden aus annotierten Bildern, die für das Netzwerk vorbereitet und augmentiert werden. Dabei werden verschiedene Transformationsmethoden wie zufälliges Spiegeln, Skalieren und Farbmodifikation angewandt, um die Robustheit des Modells zu erhöhen. Die Netzwerkschichten werden speziell für die Aufgabe konzipiert, wobei eine reduzierte Anzahl an Schichten und Ankerboxen verwendet werden, um die Berechnungseffizienz zu verbessern.

Nach dem Training des Modells werden die Ergebnisse validiert und das optimierte Netzwerk für die weiteren Analysen eingesetzt. Dieses angepasste Yolov2-Modell ermöglicht eine präzisere Verfolgung der Markerbewegungen bei gleichzeitiger Reduzierung der benötigten Rechenressourcen.

Kombination von KI mit klassische Bildverarbeitung
In diesem Schritt wird die Kombination von klassischer Bildverarbeitung und KI-Algorithmus Bildverarbeitung verwendet, um eine präzise und robuste Markerkennung sowie eine effiziente Verfolgung und Trajektorienbildung zu erreichen. Die Kombination erfolgt in zwei Phasen.

Mit klassischen Bildverarbeitung wird zunächst eine Vorverarbeitung durchgeführt. Der Sobel-Operator wird eingesetzt, um Helligkeitsgradienten im Bild zu berechnen und starke Kanten hervorzuheben. Durch Schwellenwertsegmentierung und Filterung kleinerer irrelevanter Bereiche werden nur zusammenhängende Regionen von Interesse beibehalten. Die Ergebnisse werden in Form von markierten Punkten auf den Originalbildern dargestellt, um potenzielle Markerpositionen zu bestimmen.

Im zweiten Schritt wird das Yolov2-Modell, das zuvor selbst

trainiert, um die Marker genauer zu erkennen. Dieses neu trainierte Modell wird eingesetzt, um Marker auch unter schwierigen Bedingungen wie ungleichmäßiger Beleuchtung oder Verdeckung effektiv zu identifizieren und zu verfolgen.

Die Ergebnisse der klassischen Bildverarbeitung werden durch die präzisen Vorhersagen des Yolov2-Modells validiert und ergänzt. Dieser hybride Ansatz wird genutzt, um Marker effizient zu erkennen und zu verfolgen. Die resultierenden Trajektorien weisen eine hohe Genauigkeit auf und optimieren gleichzeitig den Rechenaufwand.

Validierung von Bildverarbeitungsmethoden: Klassisch, KI und Hybrid

In diesem Schritt wird die Leistung der klassischen Bildverarbeitung, des KI-Algorithmus sowie der hybriden Methode anhand neu erstellter Bildaufnahmen validiert. Ziel dieser Analyse ist es, die Stärken und Schwächen der drei Ansätze zu ermitteln und deren Anwendbarkeit für verschiedene Bildtypen und Szenarien zu bewerten.

Die Validierung umfasst den Vergleich der Genauigkeit bei der Markererkennung sowie der Verarbeitungszeit der einzelnen Methoden. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Herausforderungen bei der Verarbeitung von Bildern mit hohem Helligkeitsgrad und Reflexionen sowie anderen Störungen in den Aufnahmen gelegt. Zusätzlich wird untersucht, inwieweit die kombinierte Methode eine verbesserte Performance gegenüber den Einzelmethoden bietet.

Zur Analyse werden zwei Videoserien verwendet, die bei Tag und Nacht unter denselben Bedingungen aufgenommen werden. Jede Serie besteht aus zwei Videoaufnahmen: einer, in der eine Person an der Kamera vorbeigeht, und einer in der ein LED-Marker vor der Kamera geschwenkt wird. Diese Aufnahmen dienen als Grundlage für die Validierung der verschiedenen Bildverarbeitungsmethoden und ermöglichen eine detaillierte Bewertung der Leistungsfähigkeit unter unterschiedlichen Lichtverhältnissen.

Der Vergleich zwischen Tages- und Nachtaufnahmen erlaubt es, die Robustheit der Methoden gegenüber wechselnden Lichtbedingungen zu bewerten und Schwächen wie Über- oder Unterbelichtung zu identifizieren. Durch diese umfassende Analyse werden die Grenzen der klassischen und KI-Algorithmus deutlich aufgezeigt. Gleichzeitig wird evaluiert, in welchen Anwendungsbereichen die hybride Methode eine überlegene Alternative darstellt.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Klassische Bildverarbeitung zur Markererkennung

Die klassische Bildverarbeitung bildet die Grundlage für die Markerkennung in dieser Arbeit. Dabei werden grundlegende Ansätze wie die Verarbeitung der Luminanz und die Analyse von Bildeigenschaften genutzt, um Marker in Schwimmaufnahmen zu identifizieren. Ein Flussdiagramm (siehe Abbildung 1) zeigt die Verarbeitungsschritte der klassischen Methode, die Kantendetektion, Regionensegmentierung und das Filtern von Rauschen umfassen. Zur Glättung der Bewegungskurven werden Filtertechniken angewendet, um präzise Darstellungen der Schwimmerbewegungen bei konstanten Bedingungen zu erreichen. Die Ergebnisse dieser Methode werden in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 1: Flußdiagramm der klassischen Markererkennung

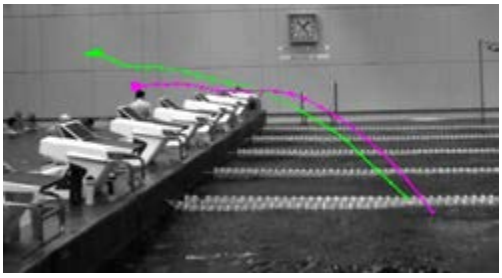
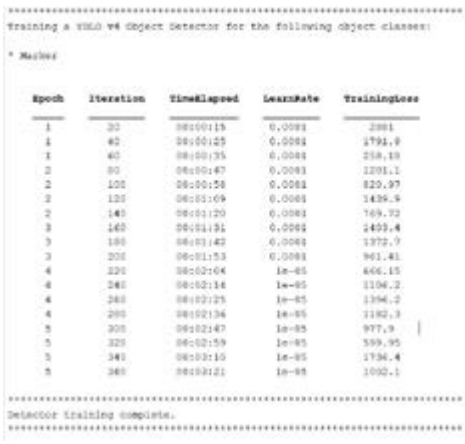


Abbildung 2: Erkannte Trajektorien von klassischer Bildverarbeitung

KI-Algorithmus zur Markererkennung

Zu Beginn wird der Yolov4-Modell für die Markererkennung verwendet. Mit Yolov4 werden die Marker zuverlässig identifiziert und ihre Positionen zur Weiterverarbeitung extrahiert. Allerdings zeigt sich, dass der Trainings- und Erkennungsprozess im Vergleich zu den Anforderungen des Systems relativ zeitaufwendig ist, siehe Abbildung 3.

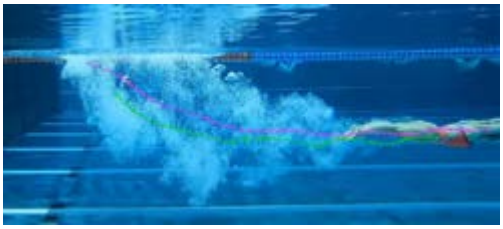

Training a YOLO v4 Object Detector for the following object classes:

* Marker

Epoch	Iteration	TimeElapsed	LearnRate	TrainingLoss
1	20	00:00:15	0.0081	2881
1	40	00:00:25	0.0081	1791.9
1	60	00:00:35	0.0081	258.19
2	80	00:00:47	0.0081	1291.1
2	100	00:00:58	0.0081	820.97
2	120	00:01:09	0.0081	1439.9
2	140	00:01:20	0.0081	769.72
3	160	00:01:31	0.0081	2403.4
3	180	00:01:42	0.0081	1372.7
3	200	00:01:53	0.0081	961.41
4	220	00:02:04	1e-05	666.15
4	240	00:02:14	1e-05	1104.2
4	260	00:02:25	1e-05	1394.2
4	280	00:02:36	1e-05	1182.3
5	300	00:02:47	1e-05	977.9
5	320	00:02:59	1e-05	559.95
5	340	00:03:10	1e-05	1736.4
5	360	00:03:21	1e-05	1002.1

Detector training complete.

a)



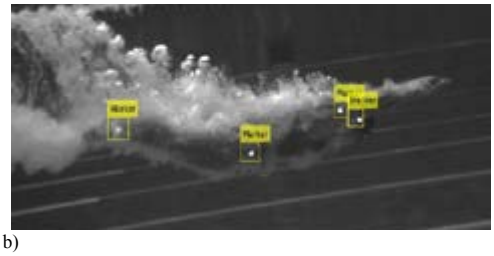
b)

Abbildung 3: a) Trainingprozess und b) Trajektorien von Yolov4-Modell

Um die Geschwindigkeit bei Training und Erkennung zu steigern, wird ein eigener Yolov2-Algorithmus entwickelt und implementiert. Durch die geringere Komplexität des selbst erstellten Modells wird die Verarbeitungszeit signifikant reduziert, ohne dass es zu einem Verlust an Genauigkeit kommt. Diese Anpassung ermöglicht es, Marker in Echtzeit zu erkennen und zu verfolgen. In Abbildung 4 sind Netzwerk und Ergebnisse der Markerkennung mit dem entwickelten Yolov2-Algorithmus dargestellt.



a)



b)

Abbildung 4: a) Netzwerk Struktur und b) Ergebnis von Selbstentwickeltes Yolov2-Modell

Kombination von KI mit klassischer Bildverarbeitung

In diesem Schritt wird die Kombination von klassischen Bildverarbeitungsmethoden mit KI-Algorithmen zur Markererkennung und -verfolgung umgesetzt. Zunächst wird der Sobel-Operator verwendet, um die Kanten und Konturen der Marker zu detektieren. Diese klassische Methode dient als Vorverarbeitungsschritt zur Merkmalsextraktion.

Anschließend wird ein selbstentwickeltes Yolov2-Modell eingesetzt, um die Marker zu erkennen und ihre Positionen zu bestimmen. Durch die Kombination der KI-Ergebnisse mit den zuvor berechneten Sobel-Gradienten wird die Erkennungsgenauigkeit weiter verbessert und eine robustere Verfolgung der Marker ermöglicht.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Die roten Bereiche zeigen die durch klassische Bildverarbeitung ermittelten Merkmale. Die gelben Ankerrahmen markieren die durch das trainierte Yolov2-Modell erkannten Ergebnisse auf diesen Merkmalen. Abschließend werden beide Verarbeitungsergebnisse mit dem Originalbild kombiniert, um eine verbesserte Erkennung zu ermöglichen.

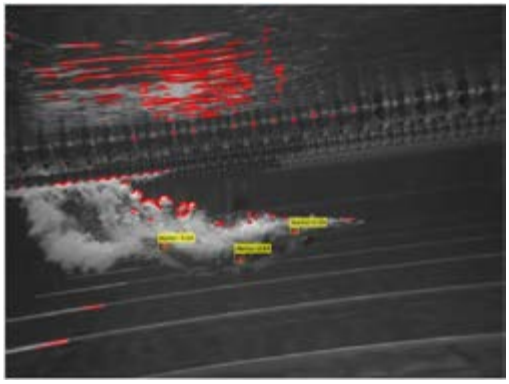


Abbildung 5: Ergebnis der Kombination von KI mit klassischer Bildverarbeitung

Validierung von Bildverarbeitungsmethoden: Klassisch, KI und Hybrid

Zur Validierung der entwickelten Bildverarbeitungsmethoden werden ein neues Videomaterial aufgenommen, bei dem der Marker während des Gehens bewegt und geschüttelt wird. Dieses Szenario simuliert dynamische Bewegungen und instabile Bedingungen, die besonders herausfordernd für die Markerkennung sind.

Im ersten Ansatz wird die klassische Bildverarbeitung angewendet, wobei der Sobel-Operator zur Kantenerkennung eingesetzt wird. Während diese Methode bei gleichmäßigen Bewegungen den Marker stabil verfolgen konnte, traten immer wieder erhebliche Probleme auf: etwa, dass die Methode keine eindeutige Identifikation der gewünschten Marker ermöglichte. Häufig führen lokale Reflexionen, helle Flecken oder Glanzlichter zu Fehlern. Zur Korrektur dieser Störungen sind zahlreiche logische Bedingungen und Einschränkungen erforderlich, was die Komplexität des Algorithmus erhöht. Zudem ist die Anpassbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Methode stark eingeschränkt, da für jede neue Umgebung oder Beleuchtungssituation individuelle Anpassungen nötig sind.

Im zweiten Ansatz wird das trainierte Yolov2-Modell eingesetzt. Diese Methode zeigt eine deutlich höhere Robustheit gegenüber dynamischen Bewegungen. Marker werden auch bei Erschütterungen und schnellen Richtungswechseln zuverlässig erkannt. Allerdings führt die leichte ungenauigkeit der Erkennungsfenster zu ungleichmäßigen Trajektorien, insbesondere bei abrupten Bewegungen.

Der dritte Ansatz kombiniert die klassische Bildverarbeitung und die KI-Algorithmus-Bildverarbeitung. Die durch den Sobel-Operator extrahierten Kantenmerkmale werden mit den Erkennungsdaten des Yolov2-Modells zusammengeführt. Unerwarteterweise stellte sich die Hybrid-Bildverarbeitung als die größte Herausforderung dar. Ziel war es, eine universelle Lösung zu entwickeln, die unter möglichst vielen Anwendungsbedingungen zuverlässig funktioniert. Doch bei stark variierenden Lichtverhältnissen ist es schwierig, allein durch Anpassungen einiger Schwellenwerte ein perfektes Ergebnis zu erzielen. Jede Anpassung führte entweder zu besseren Ergebnissen bei optimalen Lichtverhältnissen oder zu einer verbesserten Erkennung bei schwachem Licht.

In Abbildung 6 werden die Ergebnisse der drei Methoden in der Reihenfolge ihrer Anwendung dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die klassische Methode bei gleichmäßigen Bewegungen effizient und präzise ist, während die KI-Algorithmen bei komplexeren und dynamischen Bewegungen robust bleibt. Die hybride Methode kombiniert beide Stärken und liefert unter den getesteten Bedingungen die besten Gesamtergebnisse.



Abbildung 6: Bestimmung der Trajektorie einer Gehbewegung bei des aktiven Markers (oben: klassisch, mitte: KI, unten: hybrid)

5. ERGEBNISSE

Die klassische Bildverarbeitung zeichnet sich durch ihre Effizienz und geringen Ressourcenbedarf aus. Verfahren wie Kantenerkennung und Helligkeitsanalyse liefern unter stabilen Lichtverhältnissen konstante Ergebnisse. Allerdings zeigt sich, dass diese Methode empfindlich auf Änderungen von Licht, Kontrast und Hintergrundkomplexität reagiert, was ihre Genauigkeit in dynamischen oder komplexen Umgebungen einschränkt.

Die KI-Algorithmen Bildverarbeitung zeigt eine hohe Robustheit und Flexibilität. Besonders bei wechselnden Lichtbedingungen und komplexen Hintergründen erkennt sie Marker zuverlässig. Diese Methode erfordert jedoch deutlich mehr Hardware-Ressourcen und weist bei Echtzeitanwendungen Einschränkungen in der Effizienz auf. Zudem können Schwankungen in der Marker-Position auftreten, was die Gleichmäßigkeit der Trajektorien beeinträchtigt.

Die hybride Bildverarbeitung kombiniert die Vorteile beider Ansätze und zeigt eine hohe Effektivität. Klassische Methoden filtern irrelevante Bildbereiche vor, wodurch die Datenmenge für die KI reduziert wird. Dies steigert die Effizienz und verbessert die Stabilität der Trajektorien. Bei extremen Lichtverhältnissen zeigt sich jedoch, dass zusätzliche Anpassungen notwendig sind, um konsistente Ergebnisse zu erzielen.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich, dass die klassische Methode ideal für ressourcenbeschränkte Umgebungen mit stabilen Lichtverhältnissen ist, während die KI-Algorithmen Bildverarbeitung bei komplexen Szenarien und dynamischen Bedingungen die höchste Robustheit bietet. Die hybride Methode stellt einen ausgewogenen Ansatz dar, der Präzision und Effizienz kombiniert und sich besonders für Anwendungen unter moderaten Bedingungen eignet.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Arbeit untersucht und vergleicht klassische Bildverarbeitung, KI-Algorithmus Bildverarbeitung sowie deren Kombination zur Markererkennung und Bewegungsanalyse. Ziel ist es, Effizienz und Genauigkeit zu maximieren, insbesondere bei der Analyse von Schwimmstarts. Während klassische Methoden wie Helligkeits- und Kantenerkennung bei stabilen Bedingungen effizient sind, stoßen sie bei komplexen Effekten wie Reflexionen und Bewegungsunschärfen an ihre Grenzen.
Die Integration des Yolo-Algorithmus verbessert die Robustheit und Präzision der Erkennung. Ein Vergleich zwischen Yolov4 und dem selbstentwickelten Yolov2 zeigt, dass Yolov2 in ressourcenbeschränkten Umgebungen ein besseres Gleichgewicht zwischen Effizienz und Genauigkeit bietet und sich besonders für Echtzeitanwendungen eignet.

Die Kombination klassischer Bildverarbeitung und KI-Algorithmus nutzt die Stärken beider Methoden. Vorfilterung durch klassische Verfahren reduziert Datenmengen und Trainingszeiten der KI, während die Erkennungsgenauigkeit gesteigert wird. Zukünftige Arbeiten könnten adaptive Algorithmen und dynamische Schwellenwerte stärker integrieren, um Robustheit und Effizienz in Echtzeitanwendungen weiter zu verbessern.

Dennoch gibt es nach wie vor zwei zentrale Herausforderungen, die berücksichtigt werden müssen: die Lichtverhältnisse und die Verschlusszeit der Kamera. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, beeinflussen stark variierende Lichtverhältnisse die Bildverarbeitungsqualität erheblich, da selbst kleinste Reflexionen oder Schatten zu Fehlinterpretationen führen können. Gleichzeitig hat sich herausgestellt, dass die Verschlusszeit der Kamera eine entscheidende Rolle spielt,

insbesondere bei schnellen Bewegungen wie Schwimmstarts. Eine unzureichende Verschlusszeit kann Bewegungsunschärfen verursachen, die sowohl klassische als auch KI-basierte Verfahren vor erhebliche Herausforderungen stellen.

Zukünftige Entwicklungen sollten daher nicht nur auf die Verbesserung der Algorithmen abzielen, sondern auch auf die Optimierung der Aufnahmebedingungen, um die Genauigkeit und Robustheit der Markererkennung weiter zu steigern.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Tor E, Pease D L, Ball K A. Key parameters of the swimming start and their relationship to start performance[J]. Journal of sports sciences, 2015, 33(13): 1313-1321.

[2] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, Springer Nature, 2022.

[3] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," Nature, vol. 521, no. 7553, pp. 436-444, 2015.

[4] I. Cohen, L. Li, and J. Han, "Analyzing swimming techniques using computer vision," IEEE Transactions on Multimedia, vol. 20, no. 3, pp. 513-524, 2018.

[5] A. Bochkovskiy, C. Y. Wang, and H. Y. M. Liao, "YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection," *arXiv preprint arXiv:2004.10934*, 2020.

[6] J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, and A. Farhadi, "You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 779-788.

AUTOR



Chunping Li
M.MECH.V.23, 108320@fhwn.ac.at
Bachelor-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik“ an der FH Wiener Neustadt von 2018 bis 2022.
Master-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik“ an der FH Wiener Neustadt seit 2022.

SIMULATIONSGESTÜTZTE ANALYSE UND MESSTECHNISCHE VERIFIZIERUNG DES CROSSTALKS AUF HIGH-SPEED LEITERPLATTEN

Markus Mayerhofer, BSc.

Kurzfassung: *Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Simulation und der messtechnischen Verifizierung des Crosstalks auf High-Speed Leiterplatten. Die Simulationen wurden mit dem Tool HyperLynx SI durchgeführt. Durch die Variation der Simulationsparameter wie Substratdicke, Permittivität, Leitungslänge, Seperation und Terminierungen konnten die einflussreichsten Parameter identifiziert werden. Des Weiteren wurden differenzielle Leitungen, Zigzag-Leitungen, Meander und die Unterschiede der Leitungsarchitekturen Microstrip, Stripline und dem koplanaren Wellenleiter untersucht.*
Auf Basis der Simulationsergebnisse wurden drei Musterleiterplatten entworfen, auf denen sich diverse Variationen von Leitungspaaren und Meandern befinden. Um diese Musterleiterplatten zu vermessen, wurde ein Messsystem entwickelt, mit dem die charakteristische Leitungsimpedanz, die eingekoppelten Crosstalk-Spannungen der Leitungspaare und die Zeitverzögerungen der Meander gemessen werden kann.
Schlüsselwörter: *High-Speed, Simulation, Crosstalk, HyperLynx*

1. EINLEITUNG

Die sich ständig weiterentwickelnden elektronischen Geräte sind aufgrund der zunehmenden Komplexität und dem stetigen Zuwachs an Funktionen auf immer schnellere Datenleitungen zur Informationsübertragung angewiesen. Neben der Geschwindigkeit nimmt auch die Störfestigkeit gegenüber ein- und abstrahlenden elektromagnetischen Interferenzen eine entscheidende Rolle ein. Speziell in sicherheitsrelevanten Anwendungen, wie beispielsweise in Kraftfahrzeugen, Luft und Raumfahrt und in der Medizintechnik, gelten strenge Anforderungen, um eine zuverlässige Signalübertragung und eine ordnungsgemäße Funktion zu gewährleisten.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung und Optimierung des Leiterplattendesigns für High-Speed-Datenleitungen. Der Fokus liegt dabei auf dem Entwurf von Designs, um das Übersprechen (Crosstalk) von benachbarten Datenleitungen zu reduzieren. Neben parallel verlaufenden Leitungen wurde auch das Übersprechen in Zigzag-Leitungen und Meandern, sowohl im Zeit- als auch Freuenzbereich untersucht. Zur Verifikation der entworfenen Designs wurde ein spezielles Messsystem entwickelt und aufgebaut.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Als Basis für die Optimierungen werden in dieser Arbeit elektrische Simulationen genutzt, um eine vorläufige Bewertung verschiedener Materialien, Geometrien und Layer-Anordnungen bzw. Layer-Stacks durchzuführen. Die Simulationen erlauben, im Gegensatz zu realen Messungen, eine einfache, schnelle und kostengünstige Variation der einzelnen Parameter. Die vielversprechendsten Ansätze aus den Simulationen werden anschließend auf einer realen Musterleiterplatte realisiert und durch praktische Messungen im Labor verifiziert.

3. MATERIALIEN UND METHODEN

Bei zeitlich veränderlichen Vorgängen breiten sich Felder als elektromagnetische Wellen aus. Zur Beschreibung der dynamischen Ströme und Spannungen kommt das RLCG-Lumped-Element Leitungsmodell in Abb. 1 zum Einsatz, in dem die Leitung in endlich kleine Abschnitte Δz unterteilt wird. Die Leitungsbeläge sind definiert durch den ohmschen Widerstand R, die Induktivität der Leiterschleife L, der Kapazität zwischen den Leitern C und dem Leitwert des Substrats G. [1] [2]

Fließt nun ein Signal über den oberen Signalpfad, so kommt es zu einer Spannungsdifferenz $\Delta V_{(z,t)}$ an einem bestimmten Ort z und Zeitpunkt t gegenüber dem Stromrückleitungspfad. Die Spannungsdifferenz erzeugt ein lokales elektrisches Feld zwischen den beiden Leitern. Darüber hinaus entsteht gemäß dem Gesetz von Ampère um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld. Aufgrund der sich veränderlichen elektrischen und magnetischen Felder wird in den nebenliegenden Leitungen gemäß Glg. 1 und 2 durch kapazitive Kopplung ein Strom und durch induktive Kopplung eine Spannung induziert. Dazu muss das RLCG-Lumped-Element Leitungsmodell durch gekoppelte Induktivitäten und Kapazitäten erweitert werden. [3], [4]

$$I = C_m \frac{\partial V}{\partial t} \tag{1}$$

$$V = L_m \frac{\partial I}{\partial t} \tag{2}$$

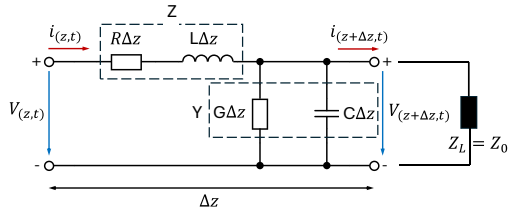


Abb. 1: RLCG-Lumped-Element Leitungsmodell

Zur Durchführung der Crosstalk-Simulationen kommt in dieser Arbeit HyperLynx SI ALT zum Einsatz. Die Crosstalk-Simulationen sind unter der klassischen Signalintegritätsanalyse einzuordnen. Diese Analyse ermöglicht die Vorhersage der Signalqualität, unter der Berücksichtigung von charakteristischen Impedanzen, Reflexionen, Topologien, Treiberimpedanzen, Signalanstiegszeiten, Terminierungen und Crosstalk.

Der Field-Solver findet die Kapazitäts- und Induktivitätsmatrizen durch das Lösen der Laplace-Gleichung

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \tag{3}$$

wobei ∇ den Gradienten des elektrischen Potentials ϕ beschreibt. [5]

Anhand der Ladungsdichten und der Spannungen können durch

$$C = \frac{Q}{V} \tag{4}$$

die Einträge der Kapazitätsmatrix berechnet werden. Die Beziehung

$$LC = \frac{\varepsilon}{{c_0}^2} \tag{5}$$

liefert die Einträge der Induktivitätsmatrix. Auf diese Weise bestimmt der Solver die Ladungsdichten nur an den Oberfläche der Geometrie. Dieser Ansatz wird als „Indirect-Boundary-Element“ (indirect BEM) bezeichnet. Da bei dieser Methode nur die Oberfläche diskretisiert wird, entstehen bei der BEM-Methode viel weniger unbekannte Variablen und somit weniger Rechenaufwand als bei der „Finite-Difference-Method“ (FDM) oder „Finite-Element-Mothod“ (FEM). Jedoch weist sie eine sehr dicht besetzte und schwer zu lösende Koeffizientenmatrix auf. [6]

Die Simulation der Signalintegrität erfolgt auf Basis von IBIS-Modellen, die hinter den Ein- und Ausgangstreibern hinterlegt sind. Im Gegensatz zu einem SPICE-Modell, welches proprietäre Informationen über den internen Aufbau beinhaltet, wird beim IBIS-Modell das Verhalten der Ein- und Ausgänge durch Spannungs-Strom und Spannungs-Zeit-Kurven in tabellarischer Form beschrieben. Die Ein- und Ausgänge des Chips werden, wie in Abb. 3 zu sehen, als dreistufiger Ein-Ausgangspuffer modelliert, der die Zustände „HIGH“, „LOW“ und „hochohmig“ annimmt. [7], [8]

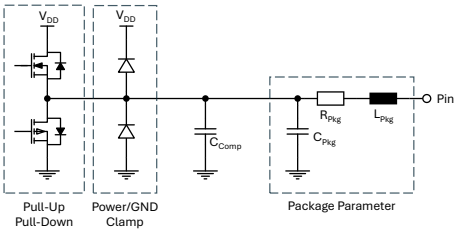


Abb. 2: IBIS-Modell Puffer

HyperLynx unterstützt eine vollständige Modellierung der frequenzabhängigen Verluste des Dielektrikums und der Leitung. Die Verluste des Dielektrikums sind im RLCG-Leitungsmodell durch eine Admittanz zwischen der Signalleitung und dem Massepotential modelliert. Die Modellierung der Leitungsverluste beinhaltet den ohmschen DC-Widerstand der Leitung, den Skin-Effekt-Widerstand und die Oberflächenrauheit der Kupferlagen.

Die Verifikation der Simulationen erfolgt durch Messungen von eigens angefertigten Musterleiterplatten im Zeitbereich. Als Messgerät wurde das High-Performance-Oszilloskop RTP164B von Rhode und Schwarz verwendet. Dieses bietet eine Bandbreite von 16GHz und eine Abtastrate von 40 Gigasamples bei 16-Bit Genauigkeit. Der im Oszilloskop eingebaute Pulsgenerator wird verwendet, um ein Rechtecksignal mit sehr steilen Flanken zu erzeugen. Dieses wird durch einen Operationsverstärker (OPA855-Q1) mit hoher Bandbreite in seiner Amplitude verstärkt. Die Messungen im Zeitbereich umfassen die Ein- und Ausgangssignale der Aggressor-Leitung sowie die Crosstalk Spannungen am nahen und fernen Ende der Victim-Leitung. Darüber hinaus wurden TDR (Time-Domain-Reflectometry) – und TDT (Time-Domain-Transmission) – Messungen zur Charakterisierung der Leitungen durchgeführt. Der Messaufbau einer Crosstalk-Messung am nahen und fernen Leitungsende ist in Abb. 3 dargestellt.

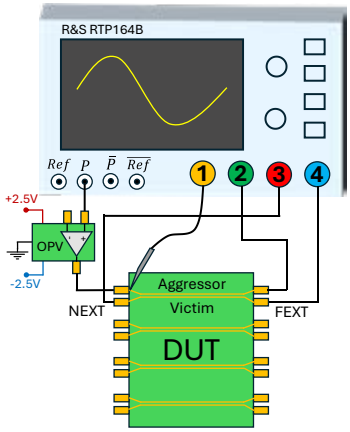


Abb. 3: Messaufbau einer Crosstalk-Messung

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG DER SIMULATIONEN

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden Simulationen von Microstrip-Leitungen und Meandern durchgeführt. Dabei wurden diverse Parameter wie Substratdicke, Permittivität, Leitungslänge, Seperation und Terminierungen variiert, um den Einfluss dieser auf das Crosstalk-Verhalten zu untersuchen.

Auf Basis dieser Simulationen wurden 3 unterschiedliche Musterleiterplatten entworfen. Die erste Musterleiterplatte besteht aus 4 Kupferlagen und enthält diverse Microstrip-Geometrien. Die zweite Musterleiterplatte dient zur Simulation und messtechnischen Verifikation von Stripline-Geometrien. Durch den 6-lagigen Aufbau wird ein möglichst symmetrischer Lagenaufbau und ein geringer Abstand zwischen den Kupferlagen erzielt. Die dritte Musterleiterplatte dient zur Untersuchung von Zigzag-Routing und übereinander verlaufenden Leitungen.

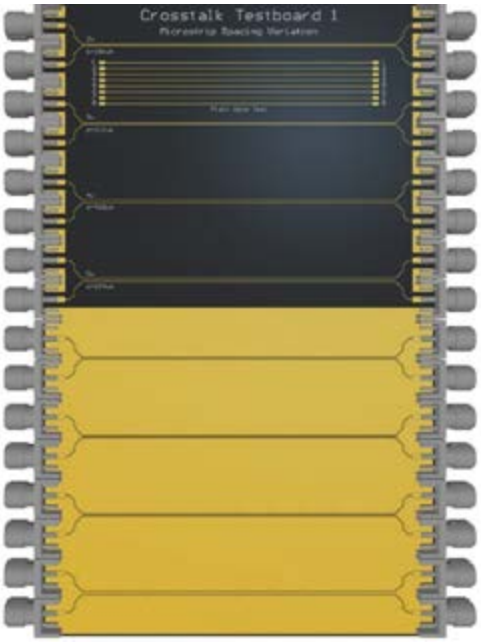


Abb. 4: Vorderseite der Microstrip-Musterleiterplatte

Abb. 4 zeigt die Vorderseite der Microstrip-Musterleiterplatte. Sie beinhaltet insgesamt 8 Leitungspaare mit einer gekoppelten Länge von 8cm. Die oberen 4 Leitungspaare unterscheiden sich in ihrem Abstand zueinander. Die unteren 4 Leitungspaare weisen die gleichen Abstände auf, sind jedoch durch eine Kupferfläche mit Massepotential umgeben. Die Kontaktierung der Leitungen erfolgt durch Edge-Mounted SMA-Buchsen an den Rändern der Leiterplatte.

Die simulierten Crosstalk-Spannungen sind in Tab. 1 aufgelistet. Die Aggressor-Leitung wird mit einem Spannungssignal mit 3,3V getrieben. Durch den Einsatz der massebezogenen Kupferflächen verringert sich das Fernübersprechen um bis zu 30%, das Nahübersprechen nur um etwa 5%.

#	Bezeichnung	T_D [ps]	NEXT [mV]	FEXT [mV]
1	MS-2w	602,4	170,5	-134,4
2	MS-3w	602,0	69,1	-98,3
3	MS-4w	601,6	37,4	-65,9
4	MS-5w	601,2	23,8	-45,7
5	CPMS-2w	592,0	165,7	-101,9
6	CPMS-3w	592,0	63,9	-77,7
7	CPMS-4w-guard	586,3	15,5	-23,8
8	CPMS-5w-guard	585,8	8,5	-13,2

Tab 1: Simulierten Crosstalk-Spannungen der Abstands-variationen der Microstrip-Musterleiterplatte

Die Bodediagramme in Abb. 5 zeigen die Kopplung am nahen und fernen Leitungsende. Während das Nahübersprechen nur bis 1 GHz auf -20 dB ansteigt, sind es beim Fernübersprechen bis zu -5dB bei 20 GHz.

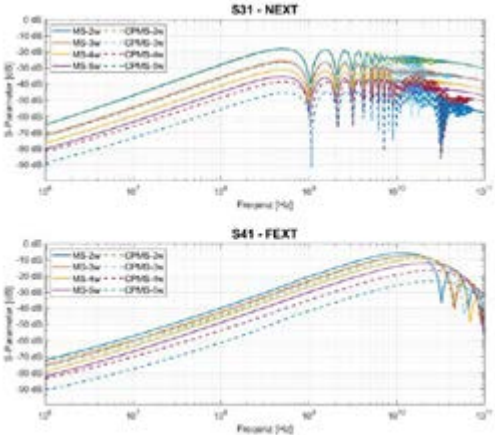


Abb. 5: NEXT und FEXT im Frequenzraum

Auf der in Abb. 6 gezeigten Rückseite der ersten Musterleiterplatte sind verschiedene Meander angeordnet. Diese variieren in ihrer Länge von 2mm bis 50mm und im Abstand. Meander werden verwendet, um die Länge der Leitung zwischen zwei Punkten gezielt zu verlängern, um die Zeitanforderungen der Signale zu erfüllen. Aufgrund der meist eng nebeneinander laufenden Leitungspfade sind Meander von Crosstalk betroffen. Den größten Einfluss auf das Signalverhalten bewirkt das Nahübersprechen, welches sich in Signalflussrichtung entlang des Meanders ausbreitet. Es besitzt eine positive Amplitude und sorgt dafür, dass sich das Signal effektiv schneller ausbreitet.

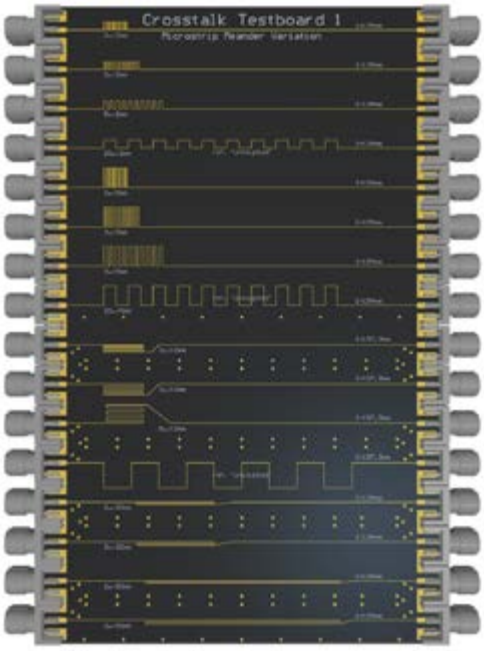


Abb. 6: Rückseite der Microstrip-Musterleiterplatte

Tab. 2 zeigt die simulierten Zeitverzögerungen der gekoppelten und ungekoppelten Meander auf der Microstrip Musterleiterplatte. Besonders das 50mm lange Meander führt zu einer starken Abweichung der Zeitverzögerung. Durch die lange gekoppelte Länge entsteht ein Puls am Ausgang, welcher bereits die Messschwelle bei 250mV überschreitet.

#	Bezeichnung	T_D [ps] uncoupled	T_D [ps] coupled	Abweichung
1	MS-2w-2mm	814,4	760,9	7,0%
2	MS-3w-2mm	814,4	790,2	3,1%
5	MS-2w-5mm	1178,4	1046,6	12,6%
6	MS-3w-5mm	1178,4	1128,5	4,4%
9	MS-2w-10mm	955,8	869,1	9,9%
10	MS-3w-10mm	955,8	924,9	3,3%
13	MS-2w-20mm	814,4	753,9	8,0%
14	MS-3w-20mm	814,4	792,3	2,8%
15	MS-2w-50mm	1178,4	830,6	41,9%
16	MS-3w-50mm	1178,4	1140,5	3,3%

Tabelle 2: Simulierte Zeitverzögerungen der Microstrip Meander

Im Frequenzraum in Abb. 7 zeigen sich deutliche Unterschiede bei der Eingangsreflexion der Meander. Während die quasi ungekoppelte Leitung „20w-5mm“ geringe Reflexionen unter -30dB aufweist, sind es bei den gekoppelten Meandern bei über 1GHz mehr als -10dB. Bei der Vorwärtstransmission der gekoppelten Meander kommt es zu Resonanzen. Umso länger die Meander sind, umso früher und stärker treten diese auf. So entsteht beim Meander „2w-50mm“ eine Resonanz von -37dB bei bereits 8GHz.

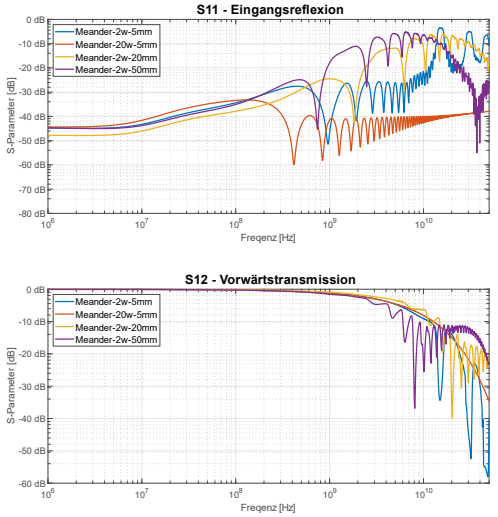


Abb. 7: Freqenzverhalten der Meander

Bei den ersten Messungen stellte das Testsignal des Pulsgenerators ein Problem dar. Es besitzt eine schnelle Anstiegszeit von 62ps und eine hohe Slew-Rate von 2,5V/ns, jedoch nur eine Amplitude von maximal 200mV. Die Amplitude der gemessenen Crosstalk-Spannung entspricht maximal 5% des Treibersignals der Aggressor-Leitung. Somit liegen die gemessenen Crosstalk-Spannungen unter 10mV und gehen im Messrauschen unter.

Um dieses Problem zu lösen wurde, wie in Abb. 3 eingezeichnet, ein Operationsverstärker zwischen dem Pulsgenerator und dem DUT geschaltet. Dieser OPV muss in der Lage sein, die Amplitude des Pulssignals zu verstärken und gleichzeitig die steilen Flanken beizubehalten. Die Auswahl fiel dabei auf den OPA855-Q1 von Texas Instruments. So konnte die Amplitude des NEXT-Crosstalks um den Faktor 10 auf 70mV erhöht werden. Der FEXT-Crosstalk, der in erster Linie von der Slew-Rate des Signals abhängig ist, konnte immerhin um den Faktor 5 auf etwa 35mV verstärkt werden.

Die differenziellen Leitungen wurden mit einem bidirektionalen 3,3V LVDS-Treiber getrieben und die Leitungsenden mit einem 100Ω Widerstand differenziell abgeschlossen.

Neben dem differenziellen Aggressor-Leitungspaar verläuft parallel ein Victim-Leitungspaar. Die darin erzeugten Störungen sind in Abb. 8 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die Spannung in der positiven Leitung, die näher am Aggressor liegt, deutlich höher ausfällt. Die Spannung in der negativen Leitung besitzt die selbe Polarität mit kleiner Amplitude. Dadurch reduziert sich differenzielle Crosstalk-Spannung gegenüber der Single-Ended Spannung.

Differenzielle Leitungen neigen im Allgemeinen zu wenig Übersprechen in benachbarte Leitungen. Durch die entgegengesetzten Spannungspegel und dadurch gegenlaufenden Leitungsströmen kommt es zu einer teilweisen Auslöschung der elektrischen und magnetischen Streufelder. Wird nur eine der differenziellen Aggressor-Leitungen getrieben, so bildet sich ein stärkeres elektromagnetisches Feld aus, da das Feld der zweiten Leitung mit inverser Polarität nicht entgegen wirkt. Als Konsequenz kommt es zu höheren Single-Ended Spannungen. Da das Feld jedoch auf beide Victim-Leitungen einwirkt verändert sich die differenzielle Crosstalk-Spannung nur leicht.

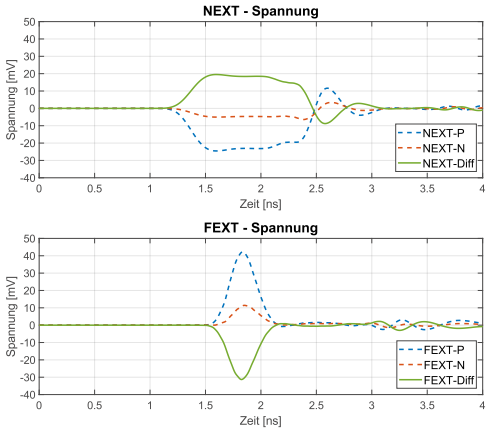


Abb. 8: Crosstalk der differenziellen Leitungen

5. ERGEBNISSE DER MESSUNGEN

Abb. 9 zeigt exemplarisch die Messung der Crosstalk-Spannungen der Microstripleitung im Abstand von 2w im Zeitbereich. Darin ist die Eingangsspannung der Leitung in Gelb, die Ausgangsspannung in Grün, die Crosstalk-Spannung am nahen Ende in Rot und am fernen Ende in Blau gekennzeichnet. Der Crosstalk am nahen Ende weist einen trapezförmigen Spannungspuls mit 70mV auf, dessen Dauer der doppelten Ausbreitungsverzögerung der Leitung entspricht. Der Verlauf und die Amplitude des Crosstalks am fernen Ende ist bestimmt durch den Verlauf und die Slew-Rate des Aggressor-Signals. Die Amplituden des NEXT- und FEXT-Crosstalks können mit

$$NEXT = k_b = \frac{V_{NEXT}}{V_i} = \frac{1}{4}\left(\frac{C_M}{C_L} + \frac{L_M}{L_L}\right) \quad (6)$$

$$FEXT = \frac{l}{t_{rise}} \cdot k_f = \frac{V_{FEXT}}{V_i} = \frac{1}{2}\left(\frac{l}{v_p \cdot t_{rise}}\right)\left(\frac{C_M}{C_L} - \frac{L_M}{L_L}\right) \quad (7)$$

abgeschätzt werden, wobei k_b und k_f die Crosstalk-Koeffizienten, l die Leitungslänge, t_{rise} die Signalanstiegszeit, v_p die Signalausbreitungsgeschwindigkeit, C_L und L_L die Eigen-Kapazität und Induktivität und C_M und L_M die gekoppelte Kapazität und Induktivität beschreibt.

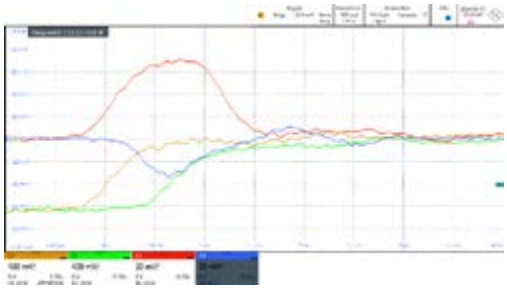


Abb. 9: Messung der Crosstalk-Spannung der Microstrip-2w Leitung mit Messverstärker

Die Messergebnisse des Nahübersprechens in Abb. 10 und Fernübersprechen in Abb. 11 der differenziellen Leitungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Simulationen. Die differenzielle Spannung wird dabei über die Math-Funktion im Oszilloskop berechnet und ist in den Diagrammen grau eingefärbt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die maximalen Amplituden des Nah- und Fernübersprechens im Scheitelpunkt des Ausgangssignals der Leitung auftreten.

Neben den parallelen differenziellen Microstrip Leitungspaaren wurden auch übereinanderliegende differenzielle Stripline Leitungspaare vermessen, die in einem Zigzag-Layout geroutet sind. Diese Konfiguration führte zu einer enormen Reduktion des Crosstalks auf weniger als 5mV.

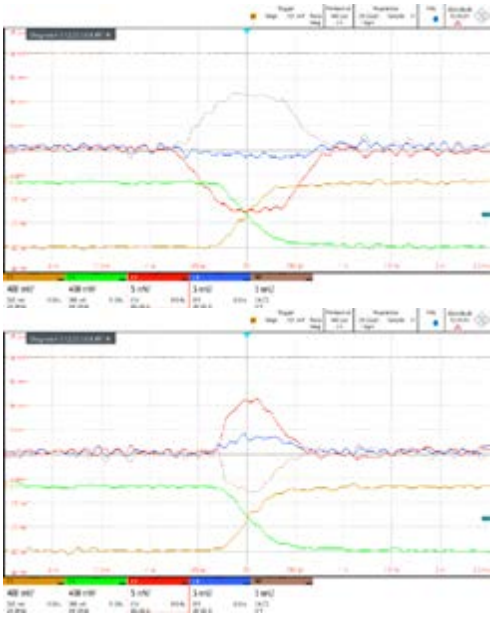


Abb. 10: Messung der Crosstalk-Spannung der differenziellen Leitung a) NEXT b) FEXT

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK (10 PT, CAPITALS, BOLD)

Bei der Variation der Simulationsparameter stellte sich die Substratdicke, der Abstand der Leitungen und die Leitungslänge als einflussreichster Parameter heraus. Bei den Variationen der Substratdicke und dem Leitungsabstand der Leitungen zeigte sich jeweils ein betragsmäßiges Maximum im Fernübersprechen. Grund dafür ist die übermäßig stark ansteigende kapazitive Kopplung bei kleinen Abständen. Die Variationen Parameter führt unweigerlich zu einer von 50Ω abweichenden Leitungsimpedanz. Wird die Abweichung zu groß, so ist es erforderlich, die Terminierung anzupassen, um den Einfluss der Signalreflexionen zu vermindern.

Einen nicht unwesentlichen Bestandteil der Arbeit stellen die Meander dar, die durch ihren serpentinenförmigen Verlauf für die Längenanpassung der Leitungen verantwortlich sind. Aufgrund der eng nebeneinander verlaufenden Leitungspfade sind diese Strukturen ebenfalls von Crosstalk betroffen.

Das Nahübersprechen, welches sich in die Signalflussrichtung im Meander ausbreitet, reduziert die effektive Ausbreitungsverzögerung des Signals. Bei sehr langen Meanderschleifen entstehen zudem Stufen im Ausgangssignal, die bereits die Schaltschwelle des Treibers überschreiten können.

Die Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Crosstalk-Spannungen zeigten eine sehr gute Übereinstimmung beim Nahübersprechen auf. Beim Fernübersprechen kam es, insbesondere bei großen Leitungsabständen und folglich kleinen Messsignalen, zu größeren Abweichungen. Eine Begründung dafür sind die vielen Abhängigkeitsparameter des Fernübersprechens, wie Signalanstiegszeit, Leitungslänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit. Besonders die Signalanstiegszeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit ist nur subjektiv mit großer Streuung zu bestimmen. Auch bei der Messung der Zeitverzögerung der Meander-Leitungen kam es zu Abweichungen gegenüber den Simulationen. Während durch den verzögerten Trigger und den Tastkopf ein systematischer Fehler entsteht, kommt es zusätzlich durch den Fiber-Wave Effekt, den Fertigungstoleranzen und nicht zuletzt dem Messrauschen zu stochastischen Fehlern.

Im Allgemeinen zeigten die differenziellen Leitungen eine gute Performance hinsichtlich Crosstalk. Diese Eigenschaften ermöglichen höhere Datenübertragungsraten und sind gleichzeitig robuster als Single-Ended Leitungen. Im Gegensatz dazu wiesen die übereinanderliegenden Single-Ended Leitungen sehr hohe Crosstalk-Spannungen von bis zu 800mV auf. Grund dafür sind die weit entfernten Masseflächen, und die große zueinander zugewandte Oberfläche der Einzelleitungen.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Wiley, 2011.

[2] Zinke und Brunswig, Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Bd. 4. Auflage, Berlin: Springer, 1990.

[3] S. H. Hall, H. Garrett W. und M. James A., High-Speed Digital System Design - A Handbook of Interconnect Theory and Design Practices, Wiley, 2000.

[4] M. Steer, Microwave and RF Design: Transmission Lines, NC State University, 2019.

[5] Mentor Graphics, HyperLynx SI/PI User Guide, 2016.

[6] X. W. Wenjian Yu, Advanced Field-Solver Techniques for RC Extraction of Integrated Circuits, Springer, 2014.

[7] Analog Devices, „AN-715 - A First Approach to IBIS Models: What They Are and How They Are Generated," 2004. [Online]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-715.pdf. [Zugriff am 06 2024].

[8] IBIS Open Forum, „IBIS Version 7.2," 01 2023. [Online]. Available: https://ibis.org/ver7.2/ver7_2.pdf. [Zugriff am 06 2024].

MAYERHOFER MARKUS



Markus Mayerhofer, BSc.
ZKW Lichtsysteme GmbH, Samuel-Morse-Straße 18, 2700 Wiener Neustadt,
02622 26800 5500, markus.mayerhofer@zkw.at

Matura „Elektrotechnik" an der HTL Wiener Neustadt 2013 bis 2018, Bachelor-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik" an der FH Wiener Neustadt 2020 bis 2022, „Hardware Design Engineer" bei ZKW Lichtsysteme GmbH seit 2022, Master-Studium „Mechatronik" an der FH Wiener Neustadt seit 2022

SYNTHESE UND SIMULATION VON MIKROFLUIDIK NETZWERKEN MITTELS COMSOL UND MATLAB

Iman Moradiberijani

Kurzfassung: *Die Manipulation von Flüssigkeiten im Ausmaß von mehreren Mikrolitern wird als Mikrofluidik bezeichnet. In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz zur Berechnung des hydraulischen Widerstands komplexer mikrofluidischen Netzwerk vorgestellt. Bei dieser Methode wurden die Vorteile sowohl der Computational Fluid Dynamics (CFD) als auch der hydraulisch-elektrischen Äquivalentmethode genutzt. Hierfür werden MATLAB-Befehle zur Steuerung und Lösung des Problems verwendet. Das Modell wird für unbekannte Strukturen mittels COMSOL und CFD gelöst und die Ergebnisse in einem Datenfile gespeichert. Für sich wiederholende Geometrien wird jedoch die hydraulisch-elektrische Äquivalentmethode eingesetzt. Dann werden durch den Aufruf der vorherigen Ergebnisse die hydraulischen Widerstände aus dem Datenfile extrahiert. Damit wird die Berechnungszeit in MATLAB im Vergleich zu CFD um bis zu 80 % reduziert. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind sehr nützlich für Benutzer, die mit Strömungsmechanik nicht vertraut sind, aber ihre Anwendung für Mikrofluidsystem nutzen möchten.*

Schlüsselwörter: *Mikrofluidik, Strömungswiderstand, CFD, mikrofluidisches Netzwerk*

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Die Manipulation von Flüssigkeiten im Ausmaß von mehreren Mikrolitern wird als Mikrofluidik bezeichnet [1]. Die besonderen Merkmale mikrofluidischer Technologien, einschließlich der schnellen Probenverarbeitung und der präzisen Steuerung von Flüssigkeiten in einem Experiment, haben sie als Alternativen für die Ersetzung gängiger Laboransätze vorgestellt [2]. Heutzutage wird Mikrofluidik in verschiedenen Bereichen eingesetzt, darunter Arzneimittelabgabe, Zellisolierung und -kultur [3], Untersuchung von Krebszellen, Dropletproduktion sowie in der Farben- und Lebensmittelindustrie [4]. Eine detaillierte Analyse der Strömung durch ein mikrofluidisches System kann mithilfe der CFD-Methode erreicht werden. CFD-basiertes Mikrofluidik-Designs erfordert jedoch in der Regel spezielle und teure Software sowie gut ausgebildete Benutzer mit umfangreichem Fachwissen in theoretischer Fluiddynamik und verwandten numerischen Methoden. Daher besteht Bedarf an einer effizienten und möglichst einfachen Strategie zum Entwurf solcher Systeme, einschließlich der Vorhersage von Druckabfall, Flüssigkeitswiderstand und Strömungsgeschwindigkeit durch Mikrokanalnetzwerke. Um die Strömung in einem mikrofluidischen Netzwerk genauer zu berechnen und zu steuern, wird üblicherweise die hydraulisch-elektrische Äquivalentmethode verwendet, bei der das Fluidiknetzwerk ähnlich eines elektrischen Netzwerks beschrieben wird [5].
In der Strömungsmechanik ist die Hagen–Poiseuille Gleichung ein physikalisches Gesetz, das das hydraulische Verhalten einer Druckströmung durch einen kreisförmigen Kanal beschreibt. In ähnlicher Weise beschreibt das Ohmsche Gesetz bei der Analyse elektrischer Schaltkreise den Spannungsabfall und den Strom in einem Widerstandsleiter. Diese bekannte Analogie zwischen hydraulischen und elektrischen Schaltkreisen ist konzeptionell nützlich für das Verständnis hydraulischer und elektrischer Schaltkreise [6,7]. Diese Methode wurde z.B. von Zhang et al. zur Modellierung eines mikrofluidischen Netzwerks verwendet [8]. Außerdem ist diese Methode für den Entwurf kapillarbasierter Mikrofluidiksysteme sehr effizient [9]. Obwohl die hydraulisch-elektrische Äquivalenzmethode im Vergleich zur CFD-Methode einfacher ist, könnte sie möglicherweise nicht die erforderliche Genauigkeit bieten. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine neue Methode zur Berechnung des hydraulischen Widerstands in einem komplexen mikrofluidischen Netzwerk vorgestellt, indem die Finite-Elemente-Methode in COMSOL und die hydraulisch-elektrische Äquivalenzmethode in MATLAB kombiniert werden. Diese Methode könnte auch für Nutzer von mikrofluidischen Chips nützlich sein, die nicht viel Erfahrung mit den Grundlagen der Fluidmechanik haben.

2. METHODEN

In diesem Abschnitt wird der Aufbau von fundamentalen Elementen und deren Zusammenfügen zu einem Netzwerk zur Simulation der Flüssigkeitsströmung erläutert.

2.1 Simulation der Flüssigkeitsströmung im Mikrofluidikkanal

Es wird das Modul „Laminar Flow“ in COMSOL verwendet, um die Flüssigkeitsströmung in einem mikrofluidischen Chip zu simulieren. Die Art der Strömung ist in der Theorie der Mikrofluidikanalyse sehr wichtig. Die Flüssigkeitsströmung wird als inkompressibel und laminar betrachtet. Außerdem gilt die Haftbedingung „no slip“ für die mikrofluidische Chipwände.
In dieser Simulation werden drei verschiedene Elemente untersucht. Das erste Element ist ein einfacher Kanal mit bestimmter Länge, Breite und Höhe. Das zweite Element ist ein kreisförmiger Sektor mit einem spezifischen Winkel von 180° und festgelegtem Innen- und Außenradius. Das dritte Element ist eine L-förmige (L90) Geometrie. In den Abbildungen 1 bis 3 ist eine dreidimensionale Ansicht jedes Elements dargestellt.



Abb. 1: Geometrie des Direktelementes



Abb. 2: Geometrie des (Kreis-) Sektors Elements



Abb. 3: Geometrie des L-förmiges (L90s) Elements

In der folgenden Tabelle sind die verwendeten Elemente und die Variablen für jedes aufgeführt:

Das Element	Elementvariablen
Direkt	W (Breite), L (Länge), h (Höhe)
Kreissektor	α (Winkel), R_i (Innenradius), R_o (Außenradius)
L-förmig (L90)	W (Breite), h (Höhe), L1 (horizontale Länge), L2 (vertikale Länge)

Tab. 1: Die verwendeten Elemente und die jeweiligen Variablen

Zu Beginn der Simulation werden die Druck- und Geschwindigkeitsbedingungen auf null gesetzt. Der Eingangsdruck im Chip beträgt 100.000 Pascal und der Ausgang des Chips hat eine konstante Durchflussrate und beträgt ein Nanoliter pro Sekunde. Somit wird der Ausgangsdruck durch die Simulation berechnet. Zusätzlich wird ein unstrukturiertes Dreiecksnetz verwendet, das in COMSOL auf den Normalmodus eingestellt ist. Die vorliegenden Modelle werden im stationären (stationary) Modus in COMSOL gelöst. Die relative Genauigkeit (relative tolerance) wird auf 0,001 eingestellt. Zur Lösung der Gleichungen wird der GMRES-Löser verwendet. Dazu wird in COMSOL der durchschnittliche Druck auf der Einlass- und Auslassebene gemessen und die Differenz aus beiden durch die im gesamten Kanal konstante Durchflussrate dividiert, wodurch sich nach Gleichung (1) den hydraulischen Widerstand R_H ergibt

$$R_H = \frac{|P_{in} - P\_out|}{Q} \quad (1)$$

wobei P_{in} der durchschnittliche Druck am Einlass, P_{out} der durchschnittliche Druck am Auslass und Q die Durchflussrate darstellt. In dieser Simulation wird der Ausgangsdurchfluss als Randbedingung am Ende des Kanals angegeben und es ist lediglich erforderlich, den durchschnittlichen Druck am Ende des Kanals zu messen. Hierzu wird zunächst ein Durchschnitt auf der Auslassoberfläche definiert und dieser Durchschnitt wird auf den Druckvariable angewendet. Nach dem Aufruf der COMSOL-Datei in MATLAB werden die geometrischen Eigenschaften als Eingabedaten übernommen, und das Modell wird entsprechend angepasst. Diese Eingabedaten werden anschließend in einer Excel-Datei gespeichert und nach jeder Ausführung wird der Widerstandswert jedes Modells zusammen mit diesen Daten berechnet. Bei nachfolgenden Durchläufen wird bei wiederholten Daten dasselbe Ergebnis wie zuvor angezeigt und das Modell wird nicht erneut gelöst.

2.2 Messung des hydraulischen Widerstands von Elementen in MATLAB

Hier wird unter Verwendung von LiveLink for MATLAB der hydraulische Widerstand jedes Elements berechnet. Zur Bestimmung des hydraulischen Widerstands wird die Funktion „mpheval" in MATLAB verwendet. Damit gibt der Benutzer in MATLAB den Befehl, den hydraulischen Widerstand der gewünschten Geometrie in COMSOL zu berechnen. Es ist zu beachten, dass in diesem Abschnitt die Befehle zum Erstellen von Geometrie, Netz und Lösen vollständig in der MATLAB-Umgebung ausgeführt werden. Daher bestand der Zweck dieses Abschnitts darin, die Simulation des Modells in MATLAB zu steuern. Im letzten Schritt wird der hydraulische Widerstand im mikrofluidischen Netzwerk mithilfe der hydraulisch-elektrischen Äquivalentmethode in MATLAB berechnet.

3. ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden zunächst die theoretischen Ergebnisse zur Lösung der Flüssigkeitsgleichungen in den Kanälen und zur Berechnung des hydraulischen Widerstands dargestellt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse in COMSOL mit diesen Gleichungen validiert. Im nächsten Schritt wird LiveLink for MATLAB (als Schnittstelle zwischen COMSOL und MATLAB) zur Steuerung der Simulation verwendet. Danach wird in beiden Programmen (COMSOL und MATLAB) der hydraulische Widerstand für jede Geometrie (jedes Element) berechnet. Im letzten Schritt werden die Ergebnisse in MATLAB ermittelt und in einer Excel-Datei gespeichert.

3.1 Vergleich von Theorie- und Simulationsergebnissen

Der hydraulische Widerstand R_H in den Kanälen mit rechteckigem Querschnitt wird nach der theoretischen Gleichung (2) unter der Annahme h < w berechnet [10].

$$R_H = \frac{12\mu L}{wh^3} \frac{1}{1 - 0.63\left(\frac{h}{w}\right)} \quad (2)$$

wobei μ die dynamische Viskosität der Flüssigkeit, L die Länge, w die Breite und h die Höhe des Kanals ist. So wird mittels COMSOL der durchschnittliche Druck am Anfang und Ende des Kanals berechnet und durch Division dieses Wertes durch die Durchflussrate der hydraulische Widerstand berechnet. Die dynamische Viskosität μ bleibt hier für alle Änderungen (Breite, Höhe und Länge) konstant und beträgt 0,001 Pa.s (Wasser). Die Abbildungen 4 und 5 vergleichen die Änderungen des hydraulischen Widerstands in Abhängigkeit von der Breite und Höhe im rechteckigen Kanal in Theorie und Simulation. Die Breite ändert sich von 6 auf 100 Mikrometer und die Höhe von 2 auf 25 Mikrometer und die Länge des Kanals ist in beiden Fällen konstant und beträgt 2 Millimeter. Bei den Änderungen der Breite (Abbildung 4) bleiben die Länge und Höhe des Kanals konstant und betragen jeweils 2 Millimeter bzw. 5 Mikrometer. Bei Höhenänderungen (Abbildung 5) sind die Länge und Breite des Kanals konstant und betragen jeweils 2 mm bzw. 30 µm. Der Trend der Änderungen des hydraulischen Widerstands lässt sich in beiden Fällen anhand der Änderung der Breite und Höhe des Kanals erkennen. Wie erwartet hat sich mit zunehmender Höhe und Breite des Kanals die Querschnittsfläche vergrößert und damit bei konstantem Flüssigkeitsfluss hat sich der hydraulische Widerstand verringert. Wie in den Abbildungen 1 und 2 zu sehen ist, verläuft der Änderungsprozess des hydraulischen Widerstands nicht linear in Bezug auf die Änderung von Breite bzw. Höhe. Gemäß der Simulation ist die Gültigkeit von Gleichung (2) gegeben, wenn die Höhe kleiner als die Breite oder höchstens 1,5 mal so groß wie die Breite ist. Andernfalls (wenn die Höhe mehr als 1,5 mal so groß wie die Breite ist) wird der Widerstandswert in dieser Gleichung negativ.

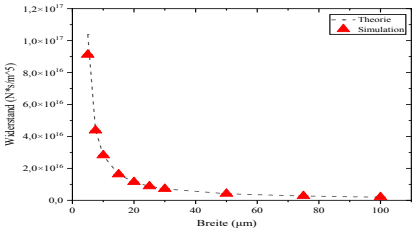


Abb. 4: Hydraulischen Widerstand in einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt in Form von Simulation und Theorie bei Änderungen der Breite (u= 0.001 Pa.s. L = 2 mm. H = 5 µm)

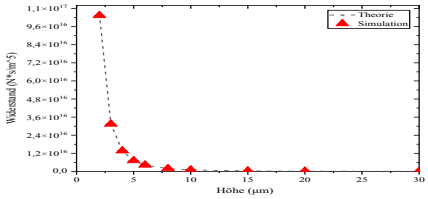


Abb. 5: Hydraulischen Widerstand in einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt in Form von Simulation und Theorie bei Änderungen der Länge (µ= 0,001 Pa.s, B = 30 µm, H = 5 µm)

Abbildung 6 zeigt die Änderungen des hydraulischen Widerstands in Abhängigkeit der Länge in einem rechteckigen Kanal in Theorie und Simulation. Bei den Änderungen der Länge bleiben die Breite und Höhe des Kanals konstant und betragen jeweils 30 bzw. 5 Mikrometer. Es ist zu erkennen, dass der hydraulische Widerstand mit zunehmender Kanallänge zunimmt. Die Vergrößerung der Länge wird als Lösung zur Erhöhung des Widerstands in einem mikrofluidischen Netzwerk genutzt.

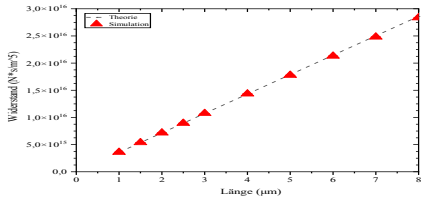


Abb. 6: Hydraulischen Widerstand in einem Kanal mit rechteckigem Querschnitt in Form von Simulation und Theorie bei Änderungen der Höhe (µ= 0,001 Pa.s, L = 2 mm, B = 30 µm)

Tabelle 2 zeigt den größten prozentualen Unterschied zwischen den Theorie- und Simulationsergebnissen bei Änderungen der Breite, Höhe und Länge des rechteckigen Kanals.

Änderung	Breite	Höhe	Länge
Der größte Prozentualer Unterschied (%)	4,6 %.	3,7 %.	0,9 %

Tab. 2: Der größte prozentuale Unterschied (%) zwischen Theorie- und Simulationsergebnissen bei Änderung der Breite, Höhe und Länge im Kanal mit rechteckigem Querschnitt

3.2 Hydraulischer Widerstand im mikrofluidischen Netzwerk

In diesem Abschnitt wird der hydraulische Widerstand für einen Mikrofluidikkanal (Netzwerk 1 in Abbildung 7) berechnet, der aus verschiedenen Elementen besteht. Um den hydraulischen Widerstand dieser Kanäle -aber auch einzelner Elemente- in COMSOL zu berechnen, wird die Druckdifferenz am Anfang und Ende des Kanals durch die Durchflussrate dividiert. Bei Verwendung von LiveLink for MATLAB wird jedoch der hydraulische Widerstand des Kanals anhand der hydraulisch-elektrische Äquivalenzmethode berechnet. In diesem Teil werden sowohl die CFD-Methode als auch die hydraulisch-elektrische Äquivalenzmethode eingesetzt. Die CFD-Methode wird verwendet, um die Details der Simulation darzustellen, und die hydraulisch-elektrische Äquivalenzmethode wird verwendet, um das Netzwerk zu entwerfen und Zeit zu sparen. Des Weiteren wird die Berechnungszeiten (Lösungszeiten) in beiden Programmen angegeben. Dabei wird die Berechnungszeit in MATLAB auf zwei Arten berichtet. Die erste für den Fall bezieht sich auf den Zeitpunkt, zu dem die Geometrie neu ist. In diesem Fall werden die Lösungsbefehle von MATLAB ausgegeben, während das Modell mittels des COMSOL-Lösers gelöst wird. Die zweite für den Fall bezieht sich jedoch auf den Zeitpunkt, dass die Geometrie der Elemente wiederholt wird. In diesem Fall reicht es aus, die Kirchhoffschen Regeln zu verwenden, und die Berechnungszeit in MATLAB reduziert sich auf etwa 14 Sekunden. In Tabelle 3 sind diese Werte angegeben.

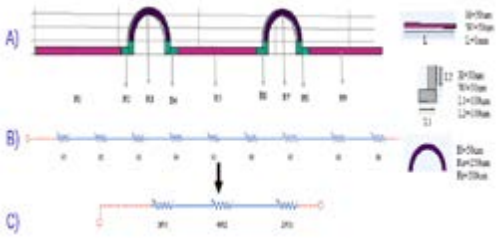


Abb. 7: A) Geometrie des Netzwerks 1 in COMSOL B) Ähnliche elektrische Widerstände im Stromkreis C) Äquivalente Widerstände

R_H in MATLAB	R_H in COMSOL	Berechnung (COMSOL)	Erste Berechnung (MATLAB)	Zweite Berechnung (MATLAB)
2.35 E13	2.33 E13	20 s	87 s	14 s

Tab. 3: Hyd. Widerstand (R_H) im mikrofluidischen Netzwerk 1

3.3. Netzwerk (Musterwiederholung) und Berechnungszeit

In diesem Abschnitt wird ein sich wiederholendes Muster wie Netzwerk 1 in einem Mikrofluidiksystem betrachtet und die Berechnungszeit für ein bis 200 Muster in COMSOL und MATLAB untersucht. Abbildung 8 zeigt die Geometrie dieses Netzwerks und das verwendete Muster.

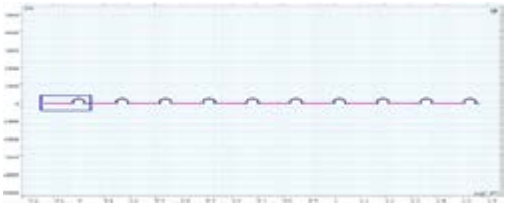


Abb. 8: Die Geometrie von Netzwerk 1 und das Muster

Wie in Tabelle 4 zu ersichtlich ist, kann durch Speichern der Daten in einer Excel-Datei und deren Aufruf (gemäß dem in MATLAB geschriebenen Code) die Lösungszeit und Berechnung des hydraulischen Widerstands des mikrofluidischen Netzwerks in MATLAB im Vergleich zur CFD-Methode um bis zu 80% (bei 200 Mustern) reduziert werden. Wenn es jedoch nur einmal ausgeführt werden soll, ist das direkte Lösen in COMSOL besser geeignet. Die Eingabedaten lauten: W= 50 µm, H= 50 µm, L= 1 mm, L1= 100 µm, L2= 100 µm, R_i =200 µm, R_o =250 µm, Q_0=10^{-6} Liter/min (1.67 x 10^{-11} m^3/s) und P_0 =10^5 Pascal

Anzahl der Muster	R_H in MATLAB	R_H in COMSOL	Berechnungszeit in COMSOL	Berechnungszeit in MATLAB
1	9,48E12	9,38E12	21 s	84 s
10	9,48E13	9,41E13	23 s	14 s
50	4,74E14	4,93E14	35 s	14 s
100	9,48E14	9,80E14	44 s	14 s
200	1,90E15	1,98E15	65 s	14 s

Tab. 4: Hydraulischen Widerstands für das Wiederholungsmuster (von Netzwerk 1)

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit war es, eine kostengünstige, validierbare und einfache Methode zur Untersuchung des hydraulischen Widerstands in Mikrofluidsystemen zu entwickeln, um deren Geometrie zu analysieren und zu optimieren. Zu diesem Zweck wurde zunächst der hydrodynamische Widerstand in Kanälen mit rechteckigem Querschnitt theoretisch berechnet. Im nächsten Schritt wurden die gleichen Berechnungen in COMSOL durchgeführt und mit den theoretischen Ergebnissen verglichen. Die Ergebnisse (Tabelle 2), zeigen, dass der größte prozentuale Unterschied zwischen den Theorie- und Simulationsdaten für die Breite, Höhe und Länge des Kanals jeweils etwa 4,6 %, 3,7 % bzw. 0,9 % betrugen. Angesichts des maximalen prozentualen Unterschieds von 4,6 %, der unter 5 % liegt, kann die in COMSOL durchgeführte Simulation als vertrauenswürdig angesehen werden. Anschließend wurde LiveLink for MATLAB (die Schnittstelle zwischen COMSOL und MATLAB) zur Steuerung der Simulation verwendet. Dabei wurde gezeigt, dass mit LiveLink for MATLAB Folgendes leicht erreicht werden kann:

- Anzeigen (Aufrufen) der Ergebnisse eines gelösten Modells in COMSOL
- Verwendung von MATLAB-Funktionen zur Steuerung der Lösung neuer Modelle (Geometrien) in COMSOL
- Verwenden von MATLAB-Funktionen zum Speichern von Daten in Excel-Dateien

Durch die Speicherung der Ergebnisse (hydraulischer Widerstand) wurde bei zukünftiger Verwendung dieser Geometrie keine erneute Lösung erforderlich und die im vorherigen Schritt erhaltenen Daten werden einfach aufgerufen bzw. angezeigt. Es ist zu beachten, dass der hydraulische Widerstand ausschließlich von der Geometrie abhängt. Im letzten Schritt wurde ein mikrofluidisches Netzwerk anhand vorher simulierter Elemente untersucht. Der hydraulische Widerstand in diesen Netzwerken wurde mit zwei separaten Methoden berechnet: Erstens mit der CFD-Simulation in COMSOL und zweitens mit der hydraulisch-elektrischen Äquivalenzmethode. Dabei wurde gezeigt, dass durch Verwendung der hydraulisch-elektrische Äquivalenzmethode und wiederholter Daten die Berechnungszeit im Vergleich zur CFD-Methode um bis zu 80 % reduziert wird. Wenn die Geometrie nicht wiederholt wird, ist die Berechnungszeit in COMSOL kürzer (ungefähr ein Viertel für das untersuchte Netzwerk 1) als bei Verwendung der hydraulisch-elektrischen Äquivalenzmethode. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind besonders nützlich für Benutzer, die möglicherweise keine Expertise in Strömungsmechanik besitzen oder nicht ausreichend mit CFD-Software vertraut sind, jedoch mikrofluidische Systeme nutzen möchten. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse sind diverse weitere Themen und Arbeiten möglich. Es wird empfohlen, mit anderen Experten an der Entwicklung eines anwendbaren Mikrofluidiksystems z.B. Organ on a Chip (OOC) zusammenzuarbeiten. Mikrofluidische Systeme wurden in dieser Arbeit vereinfacht, während ein OOC-System möglicherweise komplexe und unterschiedliche Teile enthält. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit auch vorgeschlagen, die hier vorgestellte Methode mit einer Elektronik-Software zu kombinieren, um den Ersatzwiderstand eines komplizierteren Systems zu berechnen, das aus Parallel- und Reihenschaltungen besteht. Bei dieser Arbeit wurde nur der hydraulische Widerstand der Flüssigkeit im Kanal untersucht. Zukünftige Arbeiten können auch die Beziehungen im Zusammenhang mit porösen Umgebungen (z.B. papierbasierte Mikrofluidik) berücksichtigen.

5. LITERATURVERZEICHNIS

[1] E. K. Sackmann, A. L. Fulton, and D. J. Beebe, "The present and future role of microfluidics in biomedical research," Nature, vol. 507, no. 7491, pp. 181-189, 2014.
[2] G. M. Whitesides, "The origins and the future of microfluidics," nature, vol. 442, no. 7101, pp. 368-373, 2006.
[3] M. Keshavarz and N. A. Nasab, "Cell culture techniques in microfluidic chips," in Principles of Human Organs-on-Chips: Elsevier, 2023, pp. 89-121.
[4] N. Convery and N. Gadegaard, "30 years of microfluidics," Micro and Nano Engineering, vol. 2, pp. 76-91, 2019.
[5] K. W. Oh, K. Lee, B. Ahn, and E. P. Furlani, "Design of pressure-driven microfluidic networks using electric circuit analogy," Lab on a Chip, vol. 12, no. 3, pp. 515-545, 2012.
[6] S. Vedel, "Millisecond dynamics in microfluidics: Equivalent circuit theory and experiment," 2009.
[7] N. Rousset, C. Lohasz, J. A. Boos, P. M. Misun, F. Cardes, and A. Hierlemann, "Circuit-Based Design of Microfluidic Drop Networks," Micromachines, vol. 13, no. 7, p. 1124, 2022.
[8] R. Wang and J. Zhang, "Editorial for the Special Issue on Heat and Mass Transfer in Micro/Nanosystems," vol. 13, ed: MDPI, 2022, p. 1151.
[9] A. Olanrewaju, M. Beaugrand, M. Yafia, and D. Juncker, "Capillary microfluidics in microchannels: from microfluidic networks to capillaric circuits," Lab on a Chip, vol. 18, no. 16, pp. 2323-2347, 2018.
[10] H. Bruus, Theoretical microfluidics. Oxford university press, 2007, p. 51, 75.

AUTOR



Iman Moradiberijani

Fachhochschule Wiener Neustadt, Johannes-Gutenberg-Straße 3, 2700 Wiener Neustadt

Masterstudiengang Mechatronik Fachhochschule Wiener Neustadt (2020 – 2024)
Bachelorstudiengang Maschinenbau Mazandaran Universität – IRAN (2005 – 2011)

ENTWICKLUNG EINES ZONALEN ENERGIEVERTEILSYSTEMS FÜR DIE AUTOMOBILINDUSTRIE

DI FH Manuel Reischer, BSc.

Kurzfassung: *In dieser Arbeit wird ein effizientes Konzept für eine zonale Power Distribution Unit (PDU) für die Automobilindustrie entwickelt. Durch den Wandel von einer domänenorientierten zu einer zonalen Fahrzeug-Architektur, eröffnen sich neue technische Möglichkeiten. Die Intelligenz und Signalverarbeitung, die bisher in den jeweiligen Teilnehmern wie Scheinwerfern lag, verlagert sich in ein zonales Steuergerät. Aus diesem Grund macht es Sinn, für die Versorgung dieser Teilnehmer ein zonales Leistungssteuergerät zu haben. Die PDU ist so ein zonales Energieverteilsystem für verschiedene Batterie-Architekturen. Die Einsparung von Ressourcen, die vielseitige Anwendungsmöglichkeit als Spannungsadapter und die Bereitstellung von Sicherheitsfunktionen, sowie die intelligente Steuerung und Diagnose zeichnen das System aus. Eine essenzielle Komponente der Arbeit ist die Simulation der Teilsysteme, sowie des Gesamtsystems um relevante Betriebszustände und potenzielle Fehlerfälle frühzeitig zu erkennen. Des Weiteren wird auf die wesentlichen Entwicklungsschritte eines Energieverteilsystems eingegangen. Abschließend werden die analytischen Berechnungen mit den Simulationsergebnissen verifiziert. Die innovativen Ergebnisse des vorgestellten Systems werden durch Patente geschützt.*

Schlüsselwörter: *Energieverteilsystem, Simulation, Steuerung, Diagnose, Intelligenz, Sicherheitsfunktionen, Automotive*

1. EINLEITUNG

In Zeiten von Energieknappheit und globaler Erwärmung ist der stetig steigende Energieverbrauch, ebenfalls in der Automobilindustrie von Bedeutung. Um diesen Verbrauch zu reduzieren und den ökologischen Fußabdruck zu minimieren, benötigt es innovative Entwicklungen. Dabei ist speziell das effiziente Design von elektronischen Systemen ausschlaggebend, um den Energiehaushalt zu verbessern. Aus diesem Grund gewinnt die Entwicklung von energieeffizienten Systemen, wie Electronic Control Unit (ECU)s, Energie Management System (EMS), Scheinwerfern, Rückleuchten, Dynamic Ground Projection (DGP) sowie passiven Leuchten, wie Kühlergrillbeleuchtungen, an Bedeutung. Die effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen erfordert die Optimierung der Lichtsysteme des Fahrzeugs. Dabei stellt die Kompatibilität der Teilnehmer für unterschiedliche Batterie-Architekturen Herausforderungen dar. So ist es üblich je nach Batterie-System einen Scheinwerfer in mehreren Varianten zu entwickeln, da diese nicht für den gesamten Spannungsbereich ausgelegt werden können. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist hier die Sicherheit eines elektrischen Systems und wie dieses im Falle eines Fehlers (durch sich selbst, oder durch einen angeschlossenen Teilnehmer) Schutz bieten kann. Die Lösung ist ein zonales Leistungssteuergerät, welches definierte Spannungen erzeugt und Sicherheit bietet. Dabei können durch Einsparung von Bauteilen, Ressourcen gespart werden. Dies wird durch ein effizientes Design eines Systems oder durch die Zentralisierung von Funktionen erreicht [1]. Wenn Funktionalitäten, welches jedes Lichtsystem aufweisen muss, in ein zentrales System ausgelagert werden, können Ressourcen eingespart werden. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Anpassung und Reduzierung des Energieverbrauchs, sowie auf der intelligenten Steuerung von Lasten. Ein zentraler Aspekt ist die präzise Messung von Strömen und Spannungen, die von der PDU generiert werden und deren intelligente Regelung. Es wird sich auf die Optimierung der Spannung entsprechend der Lastanforderungen, einschließlich der Ausfalldetektion und dem thermischen Management fokussiert. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der PDU ist der aktive Schutz der Energiequelle und der Lasten, die von der Power Distribution Unit versorgt werden. Ein entscheidender Faktor für die Funktionsfähigkeit des Systems ist die Kommunikation der PDU mit dem gesamten Fahrzeug. Eine Lösung für diese Aufgabe bietet die Entwicklung einer sogenannten zonalen Power Distribution Unit. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung eines solchen intelligenten Systems speziell für den Automotive-Bereich. Es werden die Architektur einer PDU und deren Integration in bestehende Fahrzeugsysteme untersucht, siehe Abb. 1, die Funktionalität simuliert und die Wirksamkeit verifiziert. Ziel ist die Reduzierung des Energieverbrauchs in der Automobilindustrie.

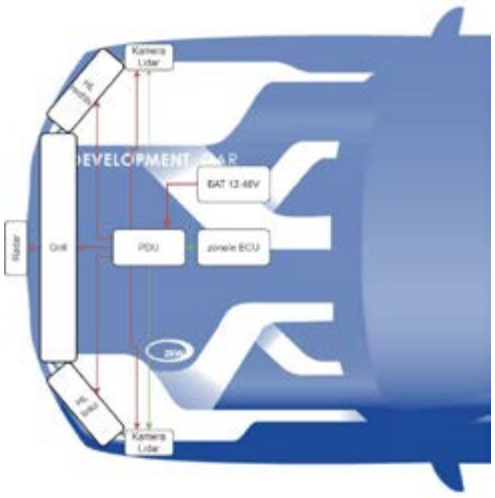


Abb. 1: PDU Integration in der Front eines Fahrzeuges

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Problemstellung:
In der Automobilindustrie führt der zunehmende Einsatz elektronischer Systeme zu einem steigenden Energiebedarf, welcher sich negativ auf den ökologischen Fußabdruck auswirkt. Dabei spielt ein effizientes Design eines elektronischen Systems eine wesentliche Rolle, um den Energiehaushalt eines Automobils zu verbessern. Ein häufig auftretendes Problem im Design elektronischer Systeme für Fahrzeuge sind die unterschiedlichen Batterie-Architekturen. PKWs besitzen eine 12V-, LKWs eine 24V- und Mild-Hybrid, beziehungsweise Elektroautos eine 48V-Batterie [2]. Aufgrund dieser unterschiedlichen Batterie-Systeme ist es bis dato nicht möglich den selben Scheinwerfer für alle Architekturen zu verwenden. Es bedarf typischerweise diverse Varianten eines Scheinwerfers um den Anforderungen der einzelnen Batterietypen gerecht zu werden. Dies ist nicht nur zeit- und kostenaufwendig, sondern auch fehleranfällig und ineffizient. Elektronische Bauteile von Lieferanten wie "Texas Instruments", "Infineon" oder "Diodes" sind zum größten Teil bis 36V spannungsfest. Bei einer 12V-Batterie ist die maximale statische Spannung 16V. Die maximal auftretende statische Spannung einer 24V-Batterie ist 36V. Komponenten, die bis 36V ausgelegt sind, können also bedenkenlos für 12/24V Batterie-Systeme verwendet werden, siehe Abb. 2. Aufgrund dessen, dass 48V-Batterie-Systeme immer beliebter und häufiger eingesetzt werden, muss dieses Spannungsniveau bei der Entwicklung eines Lichtsystems berücksichtigt werden. Im Falle eines 48V-Batterie-Systems können Überspannungen bis 60V auftreten. Problematisch ist hierbei das kleine Sortiment an spannungsfesten Bauteilen, die am Markt angeboten werden. Die Höhe der Spannungsschwankungen sind in der Regel vom Batterietyp und der Lastgröße abhängig. Ein weiteres Problem ist, dass ungewollte Auftreten von Fehlern in einem Fahrzeug. Diese sind unvermeidbar und die Ausfallwahrscheinlichkeit nimmt mit steigenden Spannungen zu.

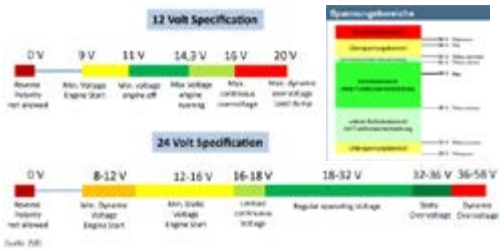


Abb. 2: Batterie Spannungen 12V, 24V und 48V [2] S. 8-9

Aufgabenstellung:
Die primäre Funktion ist die Steigerung der Effizienz von elektrischen Systemen. Dafür wird eine intelligente Power Distribution Unit konzipiert, die in Fahrzeugen mit unterschiedlichen Batterie-Architekturen eingebaut werden kann und gleichzeitig als Spannungsadapter fungiert. Mit diesem Adapter soll es unabhängig vom dahinterliegenden Batteriesystem möglich sein, dieselben Teilnehmer (beispielsweise Scheinwerfer) im Fahrzeug verbauen zu können. Diese Teilnehmer werden direkt an die PDU angeschlossen und versorgt. Des Weiteren soll eine definierte Spannung für Sensoren zur Verfügung gestellt werden. Sensoren die für Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) relevant sind, müssen aus Gründen der Ausfallsicherheit besonders abgesichert werden. Bei der sekundären Funktion steht die Sicherheit an oberster Stelle. So soll es dem System möglich sein sich selbst, aber auch die Lasten, die versorgt werden Schutz zu bieten. Das Energieverteilsystem und seine Teilnehmer sollen vor unerwünschten, elektrischen Ereignissen geschützt sein. Darunter fällt Electro Static Discharge (ESD), Electric Overstress (EOS), Leistungsabwurf gefolgt von transienten Spannungsspitzen, Überstrom, Überspannung und Unterspannung, Kurzschluss gegen Masse und Kurzschluss gegen Batterie und offene Last. Durch die Verwendung einer PDU kann sich die Architektur der Teilnehmer wie Scheinwerfer, Heckleuchten oder Kühlergrillbeleuchtungen ändern. Des Weiteren ist die Integration in bestehende Systeme ein wesentlicher Punkt der PDU. Dazu zählt auch die Kommunikation mit einer ECU. Zudem ist es relevant, die Vorteile und Herausforderungen durch die Verwendung eines zonalen Leistungssteuergeräts zu veranschaulichen. Die PDU soll primär ohne Software, also nur durch eine Hardwarekonfiguration funktionieren. Trotzdem soll durch die Verbindung mit einem Steuergerät zusätzliche Funktionalitäten ermöglicht werden. Darunter zählt die intelligente Steuerung und Diagnose des Haupt-Boost-Konverters, des Dual-Buck-Konverters, der 12V- und 5V eFuses und die Diagnose der Eingangsbeschaltung sowie der übrigen Bauteile. Auch ein priorisierter Lastabwurf, Dimming der Ströme oder Spannungsanpassungen können realisiert werden. Das System soll mittels Altium Designer aufgebaut und in einem Simulationstool als Digital Twin nachgestellt und die Funktionalität verschiedener Szenarien geprüft werden. Dazu werden die einzelnen Bauteile im ersten Schritt getrennt voneinander betrachtet und in den nächsten Schritten schließlich das Gesamtsystem simuliert.

3. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung der PDU eingegangen. So werden die einzelnen Systeme Hardware-Technisch dimensioniert, als Simulationsmodell aufgebaut und simuliert. Alle Teilsysteme werden anfänglich getrennt voneinander betrachtet. Zum Schluss werden sie im Abschnitt 4 zusammengeführt. Auf die Wechselwirkungen wird dabei zudem eingegangen. Es ist relevant zu erwähnen, dass die PDU zum Patent angemeldet wurde und aufgrund dessen zum Schutz nicht der volle Umfang des Systems abgebildet werden darf.
Die primäre Funktion der PDU ist die Nutzung als Adapter von einer typischen 12/24V Verbrennungsmotor EE-Architektur zu einer 48V Mild-Hybrid/Elektroauto EE-Architektur. Ziel ist, die gleiche Scheinwerferarchitektur für Verbrennungsmotor 12/24V und Elektroauto 48V zu erreichen. Die sekundäre Funktion der PDU ist eine zentrale, abgesicherte Versorgung zur Verfügung zu stellen, die für alle Teilnehmer im Front- oder Heckbereich des Fahrzeuges benötigt wird. Ziel ist, eine zentrale Sicherheit für sich selbst und angeschlossene Teilnehmer zur Verfügung zu stellen.

3.1 PDU - Aufbau

In Abbildung 3 ist das Blockschaltbild des Energieverteilsystems gezeigt. Dieses beinhaltet eine Eingangsbeschaltung vgl. **3.3**, DCDC-Konverter vgl. **3.4**, Elektronische Sicherungen vgl. **3.5** sowie ein Kommunikationssystem vgl. **3.6**. Jedes dieser Teilsysteme trägt dazu bei, ein intelligentes Gesamtsystem zu ergeben.

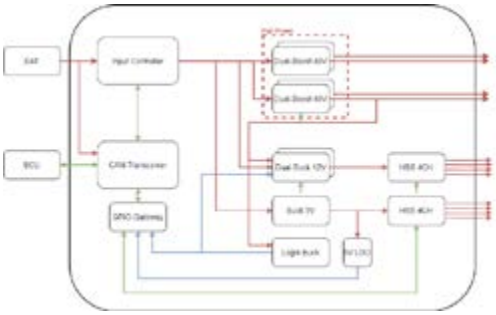


Abb. 3: Blockschaltbild der PDU

3.2 PDU - Einsparungen

Eines der Hauptargumente für ein zentrales Versorgungssystem ist die Einsparung von Bauteilen in den Last-Teilnehmern durch den Einsatz der PDU, siehe Abbildung 4. Ausschlaggebend für die Kostenreduktion ist die Anzahl der Einsparungen von Baugruppen in der Last. Daher gilt, umso mehr Teilnehmer an der PDU angeschlossen sind, desto kostengünstiger wird das Gesamtsystem. Daher verschieben sich dieselben Baugruppen (INPUT, BOOST, BUCK) der einzelnen Teilnehmer in die PDU.

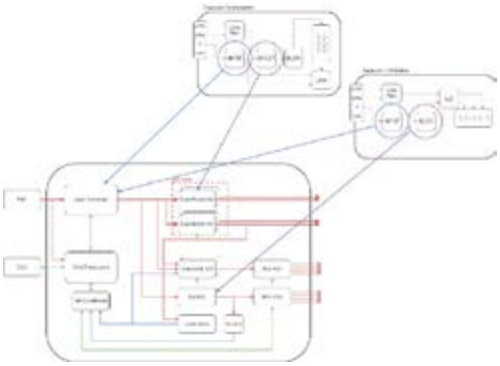


Abb. 4: Verschiebung der Baugruppen von Last zu PDU

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist, dass durch die erhöhte Spannung von 48V ein geringerer Kabelquerschnitt verwendet werden kann und dies zu einer Kosten- und Materialverringerung führt.

3.3 Eingangsbeschaltung

Die Eingangsbeschaltung ist zuständig für eine Über- und Unterspannungsabschaltung einer Überspannungsklemme, dem Verpolschutz, Überstromschutz und Schutz vor negativem Strom. Mittels dieses Gate-Treibers kann das komplette System eingeschaltet oder bei einem Fehler abgeschaltet werden [3]. Dies wird ermöglich durch eine intelligente Steuerung und Diagnose des Bauteils. Abbildung 5 zeigt das Simscape Modell einer Über- und Unterspannungsabschaltung [4].

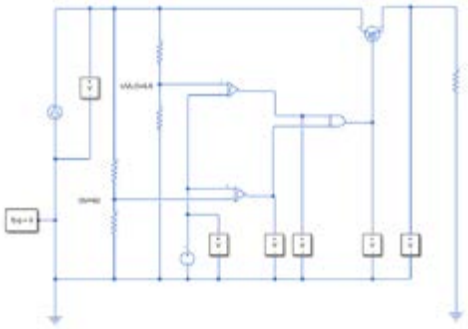


Abb. 5: UVLO und OVLO Simscape Modell und Signale

In Abbildung 6 ist die Ein- und Ausgangspannung der Schaltung ersichtlich.

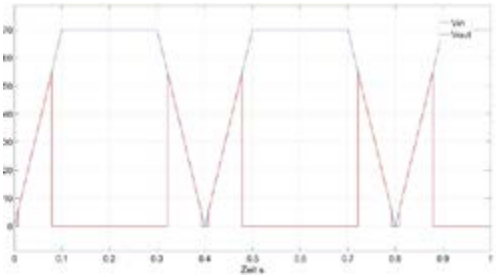


Abb. 6: UVLO und OVLO Ein- und Ausgangspannung

Zu erkennen ist, dass die Ausgangsspannung nur in einem Bereich von Vin >5V und Vin<55V durchgeschalten wird. So haben kritische Eingangsspannungen keinen Einfluss auf das System.

3.4 DCDC-Konverter

Als DCDC-Konverter werden folgende Konverter-Arten beschrieben: (a) Boost, (b) Buck, (c) Boost-Buck und (d) Sepic.
In diesem System ist ein Boost-Konverter als Hauptelement verbaut, mit dem hohe Leistungen erzeugt werden. Die Besonderheit dessen ist, dass die Spannung adaptiv den Lastverhältnissen angepasst werden kann. Diese Spannung ist typischerweise 48V, kann aber je nach Einstellung variieren. Dies trägt effektiv dazu bei, immer die optimale Leistung zur Verfügung zu stellen und somit den Energieverbrauch zu optimieren. In Abbildung 7 ist ein Dual-Boost-Konverter ersichtlich [5]. Dieser wird durch eine „Constant Voltage Control with Peak Current Mode"-Regelung geregelt [5]. Die Simulationsergebnisse werden in Abschnitt 4 näher erläutert.

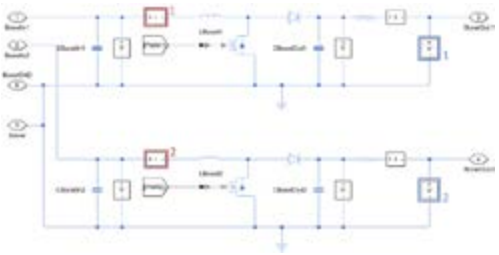


Abb. 7: Boost-Konverter Spannungs- und Stromverläufe

Ein weiteres wichtiges Element in der PDU ist ein Dual-Buck-Konverter, der für die Versorgung von ADAS relevanten

externen Teilnehmern zuständig ist [7]. Dieser Buck stellt eine 12V Spannung zur Verfügung und bietet einen speziellen Ausfallschutz. Jede Phase dieses Buck wird von zwei unterschiedlichen Spannungen versorgt. Phase 1 wird typischerweise direkt von der Batterie und Phase 2 von dem Boost versorgt. Sobald die Batteriespannungen unter 12V fällt, so wird durch eine spezielle Transistorschaltung eine smarte Phasenumschaltung auf die zweite Phase durchgeführt, um eine optimale Ausfallsicherheit für ADAS kritische Teilnehmer zur Verfügung zu stellen. Aus patentrechtlichen Gründen, kann dazu nicht der volle Umfang wiedergegeben werden. Um die Logik der externen Teilnehmer versorgen zu können wird ein 5V Buck verwendet. Dieser Konverter ist in der maximalen Stromaufnahme begrenzt [8]. Diese beschriebenen Konverter werden in Teilsysteme aufgebaut und simuliert.

3.5 Elektronische Sicherungen

Durch elektronische Sicherungen kann dem System und den zu versorgende Teilnehmer zusätzliche Sicherheit geboten werden. Der grundlegende Aufbau einer eFuse ist in Abb. 8 gezeigt [6].

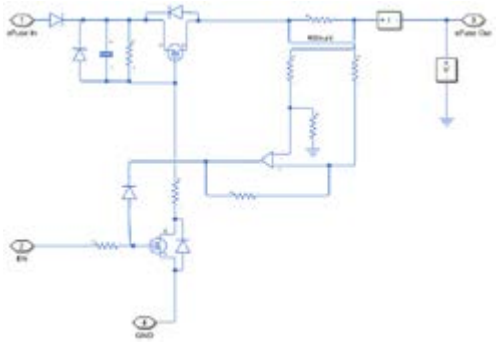


Abb. 8: eFuse Simscape Modell und Signale

In einer eFuse mit mehreren Kanälen ist die Schaltung der Abb. 8 mehrere Male ausgeführt [10]. Die 4-Kanal-eFuses in der PDU werden am 12V Dual-Buck und 5V Buck-Konverter angeschlossen und versorgen die Teilnehmer nach außen hin. Durch die Verwendung dieser Sicherungen wird es ermöglicht die einzelnen externen Teilnehmer individuell zu schalten. Zudem kann mit der Diagnose der Status jedes Kanals ausgelesen werden und bei potenziellen Fehlerfällen entsprechend reagiert werden. Mit einer zusätzlichen Schotky-Diode in Längsrichtung wird Schutz vor Reverse Current bei Short to VBat und Reverse Polarity geboten. In beiden Fällen liegt am Ausgang eine höhere Spannung als am Eingang. Die Diode unterbindet den Stromfluss durch das Bauteil und durch den Teilnehmer in Gegenrichtung. Am Ausgang befindet sich eine Schotky-Diode als Freilaufdiode für induktive Lasten. Eine weitere wichtige Aufgabe der smarten Sicherung ist die Limitierung des Stromes. Die Simulationsergebnisse zu diesen Fällen werden in Abschnitt 4 näher erläutert.

3.6 Kommunikation

Die PDU ist ein Leistungs-Steuergerät, das keinen Mikrocontroller benötigt, um eine Funktionalität zu gewährleisten. Es kann über CAN eine Verbindung zu einem übergeordneten Steuergerät hergestellt werden. Dieses kann mit der PDU kommunizieren und das System steuern sowie Diagnose durchführen. Darunter fallen die Steuerung der Boost- und Buck-Konverter und die elektronischen Sicherungen, sowie die Diagnose aller Bauteile und vieles mehr.

4. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Energieberechnung des Gesamtsystem

Für alle Teilsysteme werden umfangreiche analytische Berechnungen in einem Tabellenkalkulationstool durchgeführt. Dazu zählen (1) Berechnungen der Ströme, Spannungen, Induktivität und Kapazität der Boost- und Buck Konverter und (2) Leistungs- und Verlustberechnungen. Die Energieverteilung im System lässt sich in einem Sankey-Diagramm darstellen, siehe Abb. 9.

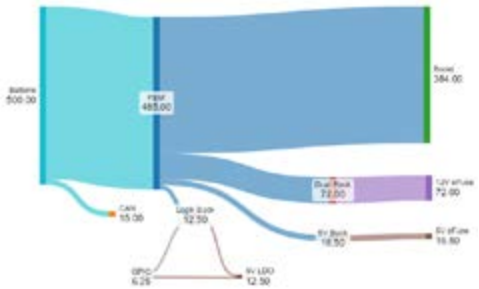


Abb. 9: PDU Energieverteilung Sankey-Diagramm bei Maximallast [W]

4.2 Gesamtsystem in Simulink

Das Gesamtsystem wird in zwei Teilen simuliert: (a) Gesamtsystem ohne eFuses, hierbei werden die DCDC-Konverter ohne eFuses simuliert und (b) Gesamtsystem mit eFuses, wobei die DCDC-Konverter durch Spannungsversorgungen nachgebildet werden. Der Grund dafür ist, dass ein DCDC-Konverter einen anderen Solver und Simulationszeit aufweist, als die elektronischen Sicherungen. Abbildung 10 zeigt das Gesamtsystem der PDU in Simulink.

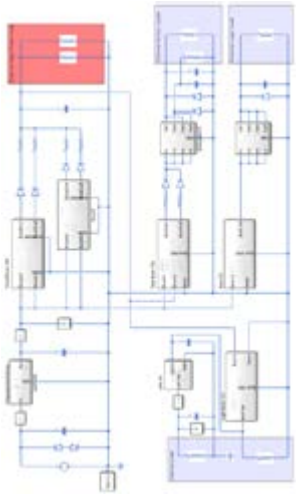


Abb. 10: PDU Simscape Modell

Aus der Simulation ohne eFuses ergeben sich für die Spannungen und Ströme der DCDC-Konverter die Verläufe wie in Abb. 11 und Abb. 12 gezeigt. Die Spannungen des Quad-Boost sind in (a), des Dual-Buck in (b) und des Logik- und 5V Buck in (c) dargestellt. Die Ströme des Quad-Boost sind in (d), des Dual-Buck in (e) und des Logik- und 5V Buck in (f) ersichtlich.

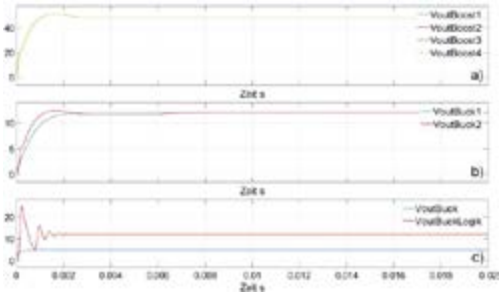


Abb. 11: Spannungen der DCDC-Konverter

Beim Vergleich der Ergebnisse zwischen Teilsimulationen und der Gesamtsimulation können Abweichungen festgestellt werden. Zu erkennen ist, dass aufgrund der Belastung des Boost-Konverters durch eine Phase des Dual-Buck und des Logik-Buck in Kombination mit den großen Kapazitäten, die aufgeladen werden müssen, sich die Start-Zeit in (a) verlängert. Dabei erreicht der Boost-Konverter nach rund 3ms seinen Spannungssollwert im Vergleich zu 1,5- 2ms in der Einzelsimulation. Beide Phasen des Dual-Buck-Konverters starten in rund 3ms, wobei Phase 1 von der Batterie (13V) und Phase 2 vom Booster (48V) gespeist wird (b). Phase 1 startet in 3ms im Vergleich mit der Einzelsimulation 2,5-3ms und Phase 2 startet ebenso in 3ms im Vergleich mit der Einzelsimulation 0,5ms. Zudem tritt bei der Simulation ein leichtes Überschwingen auf. Der Logikversorgungs-Buck weist eine Spannungsspitze von 25V auf und schwingt sich in 2ms auf den Sollwert ein. Im Vergleich startet die Einzelsimulation in 0,25ms und weist kein Überschwingen auf. Der 5V Buck startet in rund 1ms welches denselben Wert wie in der Einzelsimulation darstellt (c).

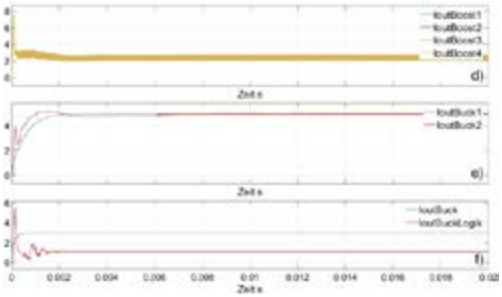


Abb. 12: Ströme der DCDC-Konverter

In (d) weist der Strom der Boost-Konverter Phasen einen anfänglich hohen Strom von 8A auf. Im eingeschwungenen Zustand sinkt der Stromripple auf rund 1A. Der Strom in den beiden Phasen des Dual-Buck verhaltet sich der Spannung in (b) fast gleich. IoutBuck2 weist einen kleinen Einbruch im Strom auf, welcher auf den Stromeinbruch im Booster (d) (zur gleichen Zeit) zurückzuführen ist. Auch der Strom des Logik-Buck in (f) weist diesen Stromeinbruch auf, da dieser vom Booster gespeist wird.

Aus der Simulation mit eFuses ergeben sich die in Abb. 13 gezeigten Spannungs- und Stromverläufe. In diesen Verläufen werden verschiedene Fehlerfälle wie Kurzschluss zu Masse (a) oder Batterie (b), Verlust der Last, induktives Schalten (d) oder Normalbetrieb (c) simuliert.

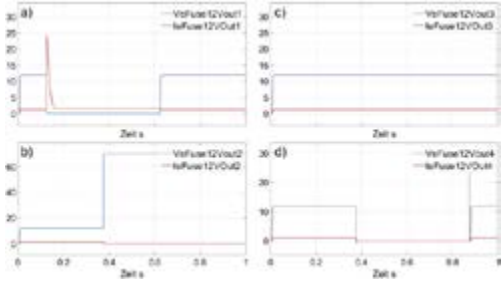


Abb. 13: eFuse Spannungen und Ströme bei Fehlerfälle

Hierbei ist zu erwähnen, dass die Unterschiede zwischen Teil- und Gesamtsimulation gering sind. Auch Kreuzeinflüsse zwischen verschiedenen Kanälen der e. Sicherungen bei Simulation eines Fehlerfalls konnten nicht festgestellt werden.

4.3 Interpretation der Ergebnisse

Es ergibt sich für Boost- und Buck-Konverter je nach Regelparameter eine Zeit um die Sollspannung zu erreichen. Bei Zusammenführung zu einem Gesamtsystem tritt durch die elektrische Kopplung eine Veränderung der Start-Zeit des Konverters auf. Des Weiteren kann es zu Überschwingen oder zu Spannungsminderungen sowie Schwingungen kommen. Dies ist abhängig von der Regelung, aber auch von der Größe der zusätzlichen Kapazitäten, die im Gesamtsystem eingebaut sind. Durch die Kaskadierung von Boost- und Buck-Konverter (Phase 2 des Dual-Buck / Logik-Buck), führt dies beim Ausgangsstrom des Boost Konverters zu einem größeren Stromripple. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der MOSFET der Buck-Konverter den Strom von 0 auf Imax schaltet. Zudem wirkt sich dies direkt auf den Ausgangstrom der dahinter geschlossenen Konverter aus. Der Einsatz von zusätzlichen Dioden in Längsrichtung außerhalb vom Booster ist in der Realität unüblich. Werden diese nicht platziert, so entlädt sich der Kondensator und der Boost muss mehr Strom aufbringen, um diesen erneut zu laden, was wiederum zu einem größeren Stromripple führt. Die Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zu der Berechnung auf. Das Verhalten der Konverter ist somit gut einschätzbar.

Umso größer die Ausgangskapazität der eFuse beziehungsweise der zu versorgenden Last, desto kleiner ist der Stromimpuls. Da mehr Strom benötigt wird, um die Kapazität zu laden und daher beim Auftreten eines Kurzschlusses zu wenig Energie für einen hohen Impuls übrig bleibt. Weiters zeigt sich, dass eine Diode am Versorgungspin einer eFuse essentiell für den Schutz des Bauteils, aber auch der Lasten ist. Diese verhindert den Stromfluss bei Verlust der Last und bei einem Kurzschluss zur Batterie. Auch eine Freilaufdiode ist relevant, wenn induktive Lasten geschaltet werden. Im Großen und Ganzen spiegelt das Verhalten der Simulationsmodelle auch die Erwartungen der Realität wieder.

4.4 Ausblick

Die nächsten Schritte beinhaltet das Zeichnen des Hardware Layouts basierend auf dem Hardware Design und die Produktion der fertiggestellten Platinen. Des Weiteren können dem System verschiedene Tests unterzogen werden, um die Funktionsfähigkeit zu verifizieren.

5. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wird ein funktionales und effizientes Konzept für eine Power Distribution Unit entwickelt, das sowohl den Anforderungen der Automobilindustrie als auch den Anforderungen eines zonalen Energieverteilsystems für verschiedene Batterie-Architekturen standhält. Es wird speziell Wert auf die Einsparung von Ressourcen gelegt. Das System soll als Spannungsadapter fungieren, mit dem es möglich ist, eine individuelle Verteilspannung für die Lasten der PDU bereitzustellen. Auch auf die Bereitstellung von Schutzmaßnahmen wird in dieser Arbeit eingegangen. Die Verwendung von elektronischen Sicherungen ist von besonderer Bedeutung. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die intelligente Steuerung und Diagnose des Gesamtsystems mit all ihren Bauteilen. Essenziell in dieser Arbeit ist die Simulation. Dadurch ist es möglich relevante Betriebszustände zu simulieren und wertvolle Erkenntnisse für das reale System zu gewinnen. Des Weiteren können potentielle Fehler in der Dimensionierung im Vorhinein erkannt und heraus-optimiert werden. Dies kann zu einer Optimierung und Einsparung von Hardware- Schleifen führen und somit die Entwicklung eines elektrischen Systems kosten-technisch verbessern. Für die Entwicklung eines elektronischen Systems werden folgende Schritte durchgeführt: (a) Entwurf eines groben Blockschaltbildes auf Basis der zuvor definierten Anforderungen, (b) Auswahl geeigneter Bauteile, diese müssen die Anforderungen des Systems erfüllen, (c) Erweiterung des Blockschaltbildes auf logische Verknüpfungen der Bauteil-Pins, (d) Erstellung eines Schaltplans samt Berechnung einzelner Komponenten für Bauteile und (e) Simulation der einzelnen Komponenten (Teilsysteme) und die Simulation des Gesamtsystem (Verknüpfung der Teilsysteme). Die Ergebnisse dieser Arbeit sind ein vollständiger Schaltplan eines Energieverteilsystems sowie Berechnungen, die für die Erstellung des Schaltplans relevant sind. Darunter zählen die Berechnung der Spulen der DCDC-Konverter für verschiedene Spannungen, die Auslegung der passiven Komponenten der Bauteile und die Verlustberechnung der Teilsysteme sowie des Gesamtsystems. Des Weiteren zählen die Simulation der Teilsysteme sowie die des Gesamtsystems zum Ergebnis. Die Entwicklung einer Power Distribution Unit (Leistungssteuergerätes) für die Automotive-Industrie bedarf einem fundierten Wissen in den Bereichen Hardware-Design und Hardware-Architektur. Diese Arbeit zeigt, dass ein zonales, intelligentes Leistungssteuergerät technisch realisierbar ist. Es wird das stetige Potenzial für Optimierungen genutzt, um bestehende Architekturen effizienter zu gestalten.

6. LITERATURVERZEICHNIS

[1] W. Wang, K. Guo, W. Cao und others, „Review of Electrical and Electronic Architectures for Autonomous Vehicles: Topologies, Networking and Simulators," *Automotive Innovations,* Bd. 7, p. 82–101, 2024.

[2] L. Kostal, L. Schmidhauser, L. Kabel und R. Bosch, „Spannungsklassen in der Elektromobilität," *Automotive Innovations,* Bd. Ausgabe 2021, p. 44, 2021.

[3] T. Instruments, „LM74930-Q1 Automotive Ideal Diode Surge Stopper With Circuit Breaker, Overvoltage Protection, and Fault Output," 2023.

[4] P. Sachdev, „Adding Hysteresis for Smooth Undervoltage and Overvoltage Lockout," *AnalogDialogie,* p. 3, 2021.

[5] Infineon, „LITIX™ Power TLD6098-2ES Multitopology dual-channel DC-DC controller," 2021.

[6] V. Yousefzadeh, „Stability Analysis of BOOST Voltage Regulators Connected to Constant Power Loads," in *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2018.

[7] Infineon, „TLD5501-2QV Dual SYNC Buck Controller with SPI Interface," 2021.

[8] Diodes, „3.8V TO 60V INPUT AUTOMOTIVE GRADE, 3A LOW IQ SYNCHRONOUS BUCK CONVERTER," 2022.

[9] R. Panguloori., „Basics of eFuses," *Texas Instrument,* p. 14, 2018.

[10] T. Instruments, „TPS4H160-Q1 40-V, 160-mOhm Quad-Channel Smart High-Side Switch," 2019.

MANUEL REISCHER



DI FH Manuel Reischer

ZKW Lichtsysteme GmbH, Samuel-Morse-Straße-18, +436803191531, Manuel.Reischer@zkw.at

HTL-St. Pölten, Abteilung: Elektrotechnik; **Westsächsische Hochschule Zwickau**, Fakultät: Elektrotechnik, Schwerpunkt: Elektromobilität, **ZKW-Lichtsysteme**, Tätigkeit: Vorentwicklung; **Fachhochschule Wiener Neustadt**, Fakultät: Mechatronik

FUßGÄNGERERKENNUNG MIT HILFE VON 3D-LIDAR DATEN

Amin Same Nasayeh, BSc.

Kurzfassung: *Ziel dieser Arbeit ist die Erkennung von Fußgängern aus 3D-LiDAR-Daten mit Hilfe von KI-Algorithmen. Da es zur Bilderkennung schon sehr robuste und zuverlässige Methoden gibt, werden die Punktwolkendaten von einer 3D-LiDAR Aufnahme in ein 2D-Bild projiziert. Punktwolkendaten, vom verwendeten Lidarsensor können aber wegen der vorgegebenen Messtrajektorien nicht direkt als Rasterdaten dargestellt werden. Erfolgt dennoch eine Zuordnung zu einem Rasterbild bleiben viele Pixel frei, die für eine spätere Analyse „gefüllt" werden müssen. In dieser Arbeit werden mit den Methoden der künstlichen Intelligenz die unvollständigen Bilddaten ergänzt, welche dann mit OpenPose, einem Algorithmus zur Personenerkennung, weiterverarbeitet werden. Dabei kommen zwei unterschiedliche Netzwerke zur Ergänzung fehlender Bildinformationen zum Einsatz. Ein klassisches Faltungsnetzwerk ergibt eine Erkennugnsrate von 75% wogegen mit einem Autoencoder eine erkennungsrate von 62% gelingt.*

Schlüsselwörter: *Fußgängererkennung, Personenerkennung, 3D-LiDAR, Neuronale Netze.*

1. EINLEITUNG

Die Fußgängererkennung ist in der Automobilindustrie für autonomes Fahren, aber auch für ADAS (advanced drivier assistance system [1]) von großer Bedeutung. Ein wichtiger Einsatz eines Fußgängererkennungssystems besteht darin, Position und Entfernung von Fußgängern zu bestimmen. Die hierfür häufig verwendeten Sensoren sind Kameras aber auch LiDAR Sensoren. Da die Kameras von Licht- und Wetterbedingungen abhängig sind, sind sie nicht immer zuverlässig. Die LiDAR-Technologie hingegen kann bei unterschiedlichen Bedingungen robuste Informationen liefern, die Daten sind jedoch nicht einfach zu verarbeiten und schwieriger zu interpretieren. LiDAR-Daten liegen in der Regel als Punktdaten unterschiedlichen Dichte und Ausdehnung vor. In dieser Arbeit wird durch eine Transformation des LiDAR-Messdaten zu Bilddaten versucht Fußgänger mit Hilfe des KI-Netzes OpenPose [2] zu detektieren. Wegen der vielfältigen Varianten und der vielen Unterschiede in den projizierten „Punktwolkenbildern" werden in dieser Arbeit KI-Algorithmen entwickelt, um fehlende Punktinformationen zu schätzen.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Der LiDAR-Sensor erfasst eine Szene der Umgebung in Form einer Punktwolkendatei (engl. point cloud data). Die einzelnen Messwerte werden mit einem Gruppierungsverfahren aus den LiDAR-Daten extrahiert und durch Projektion in 2D-Bilder umgewandelt. Der Grund der Gruppierung ist, dass die einzelnen Objekte einfacher mit OperPose analysiert werden können als die ganze Szene. Damit OpenPose ein gutes Ergebnis liefert, muss das projizierte Bild noch bearbeitet werden, um die Lücken, zufolge fehlender Messwerte zu schließen. Diese Korrektur kann mit unterschiedlichen Methoden, wie morphologische Operationen, Dilatation, Verwendung von einem Glättungs-Gauß-Filter, Interpolation zwischen den Punkten, Pixelkorrektur mit KI-Methoden, etc. erfolgen. In dieser Arbeit vervollständigt ein KI-Algorithmus die 2D-Bilder und anschließend werden sie an OpenPose übergeben und ausgewertet.

Obwohl in den LiDAR-Daten bereits unterschiedliche Methoden zur Fußgängererkennung aus 3D-LiDAR-Daten, wie PointNet++ [3], 3D-ShapeNet [4], VoxNet [5], etc. publiziert sind, kann die Analyse aufgrund der hohen Anzahl an Punktwolkendaten zeitaufwändig sein und Ziel dieser Arbeit ist es, diesen Aufwand zu reduzieren. Jedoch kann die Anzahl der Objekte einer Szene den Erkennungsprozess auch in dieser Arbeit entscheidend beeinflussen.

3. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Zur Erfassung der Szene wird ein Blickfeld Cube Sensor mit einem Sichtfeld von $72° \times 32°$ und einer Erfassungsrate von 2.4Hz mit einem Winkelabstand von $0.4°$ und 230 Scanlinien eingesetzt. Auch wenn die Erfassungsrate für einen praktischen Einsatz noch zu gering ist, wird sie in dieser Arbeit genutzt. Die vom Sensor erfassten Daten und auch die erforderliche Verarbeitung sowie die entwickelten KI-Algorithmen sind in MATLAB kodiert.

Damit die Objekte der Szene einzeln betrachtet werden können, werden diese von einer weiteren Verarbeitung mit dem Clustering Algorithmus DBSCAN [6] gruppiert.

Die Trainingsdaten zur Parametrisierung des Netzwerkes für die Ergänzung fehlender Bildpunkte werden jeweils in zwei Varianten erzeugt. Der erste Datensatz wird mit den Graustufenbildern von Personen generiert (COCO-Datensatz), siehe Abb. 1a, und der zweite Datensatz DS2 enthält die Binärbilder menschlicher Figuren und entspricht sehr genau den LiDAR-Daten, siehe Abb. 1b.

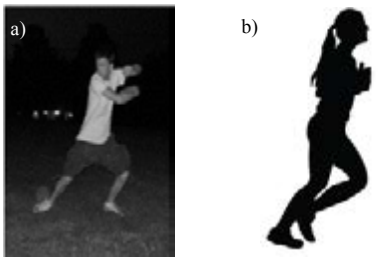


Abb. 1: a) Datensatz 1 (DS1): Graustufen Bilder von Personen, b) Datensatz 2 (DS2): Binäre Vektordaten von Personen.

Um das „Ergänzungsnetzwerk" zur Vervollständigung der projizierten LiDAR-Daten zu entwickeln, sind zwei wichtige Schritte erforderlich, der Entwurf der Netzwerkstruktur und die Vorbereitung der Trainingsdaten.

Als Netzwerkstruktur werden ein einfacher Autoencoder (AE) mit sechs Schichten, siehe Abb. 2a, und ein Faltungsnetzwerk (CNN) mit AE-Struktur gewählt, siehe Abb. 2b.

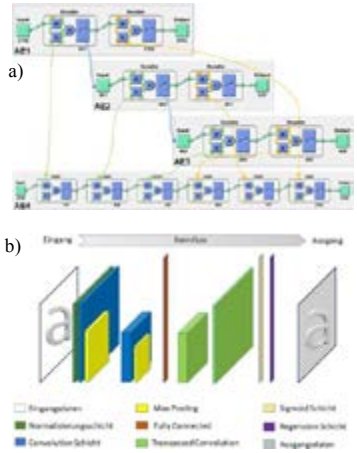


Abb. 2: a) Struktur und Initialisierung der Gewichte vom AE mit den Gewichten von zwei Vortrainierten AE, b) Struktur des in dieser Arbeit verwendeten Faltungsnetzwerkes.

Die Trainingsdaten werden mit Methoden der Datenanreicherung so erweitert und vorbereitet, dass jedes Netzwerk mit vielfältigen Bildervarianten trainiert wird. Dabei erfolgt die Auswahl der fehlenden Bildinformationen zufällig und gleichverteilt über dem Bild. Nachdem neben dem Originalbild auch das verrauschte Bild zur Verfügung steht, können sowohl Autoencoder (nicht überwachendes Lernen) als auch Faltungsnetzwerk (überwachtes Lernen) trainiert werden.

Um die Performance der Korrektur-Netzwerke zu bestimmen, werden bei den Datensätzen DS1 und DS2 zufällige Pixel durch den Wert G_{rausch} ersetzt. Dann erfolgt eine Rekonstruktion G_{kor} der fehlenden Pixel mit Hilfe der Korrektur Netzwerke, siehe Abb. 3. Im Anschluss werden alle korrigierten Pixel mit den Originalwerten verglichen und daraus die Korrekturrate (Rate der korrekt rekonstruierten Punkte)

$$R = \frac{\sum |(G_{orig} - G_{rausch})| - \sum |(G_{orig} - G_{kor})|}{\sum |(G_{orig} - G_{rausch})|}$$

bestimmt.



Abb. 3: Trainingsdaten des COCO-Datensatz mit unterschiedlichen Rauschintensität [7].

Bei der Vorbereitung der Testdaten werden der Hintergrund und der Boden von der aufgenommenen Szene, siehe Abb. 4a, eliminiert, da sie wenig Informationen liefern, Abb. 4b. Der Hintergrund wird entfernt, indem die Objekte nur bis zu einer bestimmten Entfernung betrachtet werden und der Boden wird mit einem Schwellwert eliminiert. Damit bleiben in den Daten die relevanten Objekte, die sich in der Szene befinden, siehe Abb. 4b.

Um diese einzeln zu betrachten, werden sie mit einer Clustering Methode (DBSCAN), in der XY separiert, siehe Abb. 5.

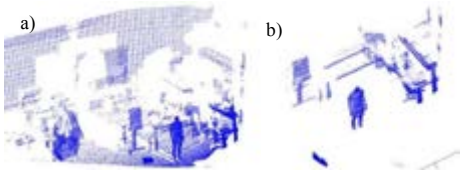


Abb. 4: a) Originale LiDAR-Aufnahme, b) LiDAR-Aufnahme mit eliminiertem Boden und Hintergrund.

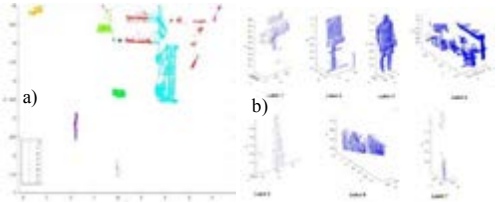


Abb. 5: a) Gruppierung von Punktwolkendaten in XY-Ebene, b) Einzelne Objekte von der Szene nach der Gruppierung.

Die LiDAR-Punkte der einzelnen Objekte werden ausschließend in die XZ-Ebene projiziert. Dadurch entsteht ein unvollständiges Rasterbild. Dann werden fehlende Pixel mit einem Netzwerk vervollständigt und mit Hilfe von OpenPose analysiert, um daraus Personen zu erkennen, siehe Abb. 6.

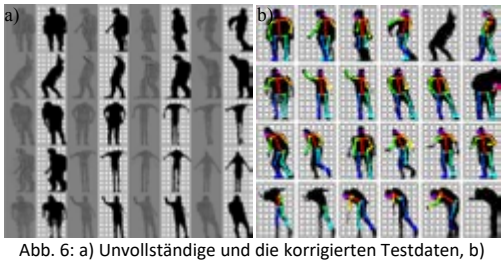


Abb. 6: a) Unvollständige und die korrigierten Testdaten, b) OpenPose Ergebnisse der korrigierten Bilder.

Zum Vergleich wird auch ein sehr Leistungsfähiges Netzwerk PointNet++ mit den LiDAR-Testdaten trainiert. Auch diese Daten werden noch modifiziert, um noch mehr Trainingsdaten zu erzeugen und ein Overfitting vom Netzwerk zu vermeiden. Die Datenanreicherung erfolgt, indem aus jeder Originalaufnahme einen Bereich zufällig eliminiert wird (Menschliche Figur bleibt immer erhalten) und die ganze Szene wird mit einem zufälligen Wert an der XY-Ebene verschoben und mit einem zufälligen Wert um die X-Achse rotiert. Somit werden aus 253 Aufnahmen 759 Szenen erzeugt, so dass 397 Szenen zum Trainieren und 362 Szenen Testen verwendet wird.



Abb. 7: Das mittlere Bild ist die Originalaufnahme und die anderen beiden Bilder sind die erweiterte Punktwolkendaten.

5. ERGEBNISSE

In einem ersten Schritt wird die Qualität der Rekonstruktion der fehlenden Bildpunkte bewertet. Dazu werden zufällige Bildpunkte aus den Trainingsdaten entfernt und mit Hilfe von Autoencoder und Faltungsnetzwerk rekonstruiert. Aus der Abweichung der tatsächlichen und der rekonstruierten Bildinformation wird die Korrekturrate R für den gesamten Datensatz bestimmt, siehe Tab. 1.

	DS1	DS2
AE	33,2%	27,7%
CNN	28,2%	42,5%

Tab. 1: Korrekturrate R für AE und CNN bei beiden Datensätzen.

Die nun vollständigen Bildrasterdaten werden zur weiteren Verarbeitung an das OpenPose Netzwerk zu Erkennung von Personen übergeben. Dabei erfolgt die Auswertung der korrekt erkannten Personen manuell durch den Autor. Die ermittelten Erkennungsraten bewegen sich zwischen 50% und 75% und sind in Tab. 2 dargestellt. Im Vergleich zu Bilddaten sind die erzielten Erkennungsraten noch sehr gering, sodass der Vorteil von LiDAR-Systemen zur Erfassung der Umgebung bei schlechten Wetterbedingungen nicht genutzt werden kann. Zum Vergleich wurden alternativ deutlich aufwendigere Netzwerke zu Verarbeitung von LiDAR-Daten untersucht. Die Zeitaufwendung bei diesen Methoden liegt bei ca. 4 s.

	DS1	DS2
AE	62%	59%
CNN	52,7%	75,1%

Tab. 2: Erkennugnsraten von Personen aus projizierten und rekonstruierten LiDAR-Daten mit Hilfe von OpenPose.

Dabei zeigt das PointNet++ Netzwerk nach dem Trainieren eine Genauigkeit von fast 100% in ca. 0.25 s pro Szene. Nachdem zum Training nur 397 Trainingsdaten zur Verfügung stehen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese hohe Erkennungsrate eine Folge von Überanpassung ist. Jedenfalls zeigt das PoinNet++ das Potential bei der Nutzung von LiDAR-Daten zur Erkennung von Personen im Straßenverkehr.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit ist eine Verarbeitung von LiDAR-Punktwolken, um mit diesen eine robuste und schnelle Fußgängererkennung zu erreichen. Da es zur Personenerkennung mit Hilfe von Bild-Rasterdaten schon sehr robuste und zuverlässige Methoden gibt, werden die Punktwolkendaten in Rasterdaten transformiert, um diese mit etablierten Algorithmen weiter zu verarbeiten. Nachdem die Messtrajektorien des verwendeten LiDAR-sensors nicht direkt als Rasterdaten dargestellt werden können, fehlen im korrespondierenden Rasterbild viele einzelne Bildpunkte. Diese werden mit Hilfe von zwei KI-Algorithmen (einfacher Autoencoder und Faltungsnetzwerk) rekonstruiert. Im Anschluss werden in den ergänzten Rasterbilddaten Personen mit Hilfe von OpenPose identifiziert, wobei die Bewertung und die Bestimmung der Erkennungsrate manuell durchgeführt wird.

Die Arbeit hat gezeigt, dass die vorgeschlagene Vorgangsweise grundsätzlich sinnvoll ist, jedoch zeigen sich noch relativ hohe Fehlerraten, so dass, das entwickelte System in derzeitige Form noch nicht zur Fußgängererkennung eingesetzt werden kann.

Eine deutliche Verbesserung wird erwartet, wenn die Projektion der LiDAR-Punktwolken nicht in eine vertikale, sondern in eine horizontale Ebene erfolgt. Dann ergeben sich charakteristische Merkmale, die ebenfalls mit bekannten KI-Bildverarbeitungsalgorithmen klassifiziert werden können.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] L. Joseph and A. K. Mondal, Autonomous Driving and Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS), Florida: CRC Press, 2022.

[2] Z. Cao, T. Simon, S.-E. Wei und Y. Sheikh, „Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields ∗," 2017.

[3] R. Q. Charles, S. Hao, K. Mo und J. G. Leonidas, PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation, Stanford University, 2017.

[4] Z. Wu, S. Song, A. Khosla, F. Yu, L. Zhang und X. Tang, 3D ShapeNets: A Deep Representation for Volumetric Shapes, Princeton University, Chinese University of Hong Kong, Massachusetts Institute of Technology, 2015.

[5] D. Maturana und S. Scherer, „VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for Real-Time Object Recognition," in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Hamburg, Germany, 2015.

[6] A. Gunawan, A faster algorithm for DBSCAN, Master thesis, 28 Feb 2013.

[7] T. Lin, M. Maire, S. Belongie, C. Zitnick und P. Dollar, Microsoft COCO: Common Object in Context, 2015.

AMIN SAME NASAYEH



Amin Same Nasayeh B.Sc.

+43 660 2878 666, aminsn.pv@gmail.com

Bachelorstudium Maschinenbau, Azad Universität, Bonab, Iran 2009 bis 2013, Bachelorstudium Robotik, FH Wr. Neustadt 2018 bis 2020, Masterstudium Mechatronik, FH Wr. Neustadt 2020 bis 2023

EXPLAINABLE NEURAL NETWORKS

Nina Schmirl, BSc.

Kurzfassung: *Systeme, welche auf Künstlicher Intelligenz (KI) basieren haben sich in den letzten Jahren dramatisch weiterentwickelt und sind nun in der Lage komplexe Aufgaben autonom und zuverlässig zu lösen. Damit findet der Einsatz zunehmend Verbreitung und damit auch die Notwendigkeit, die KI-gestützten Entscheidungen zu erklären. Erklärbare Künstliche Intelligenz (engl. Explainable Artifical Intelligence) steht im Zentrum dieser Arbeit. Der Fokus liegt aufgrund der Vielfalt an Netzwerkarchitekturen auf vorwärts- und rückgekoppelten Netzwerken, mit wenigen meist vollvernetzten Schichten. Es werden State-of-the-Art Algorithmen auf die untersuchten Modelle angewandt, um zu ergründen, wie und warum ein trainiertes Netzwerk zu spezifischen Ergebnissen gelangt. Die Wahl der Algorithmen erfolgt unter der Prämisse, dass sie leicht implementierbar sind. Die über das Netzwerk gewonnenen Informationen dienen als Basis für eine Netzwerksoptimierung, bei welcher unwichtige Merkmale oder Neuronen aus dem Netzwerk entfernt werden. Dies steigert die Effizienz und senkt den Ressourcenverbrauch des Netzwerks. Die Optimierung dient gleichzeitig als Validierung der eingesetzten Algorithmen, da das Entfernen essenzieller Neuronen aus dem Netzwerk zu einem signifikanten Leistungsabfall führt.*
Schlüsselwörter: *XAI, Künstliche Intelligenz*

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Den ersten Grundstein für die Künstliche Intelligenz legte Alan Turing mit dem theoretischen Konzept der Turingmaschine. Turing beschäftigt sich bereits 1950 mit der Frage „Können Maschinen/Computer denken?“, diese Frage stellte er sich erstaunlicherweise lange bevor der erste Computer überhaupt erfunden wurde. Er entwickelt den „Turing Test“, der als bestanden gilt, wenn eine Künstliche Intelligenz ein textbasiertes Gespräch mit einem Menschen führt und die KI nicht von einem Menschen unterscheiden kann. Dann besitzt diese laut Turing Test die gleiche Intelligenz wie ein Mensch [1]. Dieser konnte in den Jahren 2011 (webbasierter Chatbot Cleverbot) und 2017 (KI generiete Rezensionen [2]) bestanden werden. Das Forschungsgebiet der künstlichen Intelligenz ist also nicht neu, aber gewinnt aufgrund der steigenden Rechenleistung und dem derzeitigen Zeitalter der „Big-Data“ immer mehr an Bedeutung. Dabei gibt es jedoch ein signifikantes Problem: Je genauer ein Modell, desto unerklärbarer erscheint es einem Menschen. Die Tastsache, dass es sich bei Künstlicher Intelligenz meist um eine Blackbox Modelle handelt, könnte den derzeitigen Boom bremsen. Viele Menschen sind daher skeptisch gegenüber Künstlicher Intelligenz und würden ihr mehr Vertrauen, wenn sie nachvollziehen könnten, wieso eine bestimmte Entscheidung getroffen wird. Diese Arbeit widmet sich der Frage, wie Entscheidungen von KI-Systemen anschaulich erklärt werden können, mit einem Fokus auf neuronale Netze. Gleichzeitig wird das Optimierungspotential aufgrund dieser Erkenntnisse untersucht. Diese Netzwerke werden mit einem Datensatz der Universität Paderborn trainiert, welcher Temperaturverläufen eines Permanentmagnet-Synchronmotors (PMSM) während des Betriebes bereitgestellt auf Basis von 11 gemessenen Kenngrößen [3]. Das Ziel der Netzwerke ist es, die Temperatur des Rotors vorherzusagen. Ihre Vorhersagegenauigkeit wird mittels einem von null bis eins normierten gemittelten quadratischen Fehler MSE_{norm} bewertet.

3. VORGANGSWEISE UND METHODEN

Zur Analyse der Neuralen Netzwerke werden State-of-the-Art Algorithmen wie die Permutation und Ablation verwendet. Bei der Permutation werden die Datenreihenfolgen einzelner oder mehrerer Eingangsgrößen im Testdatensatz zufällig vertauscht. Dies führt bei für die Vorhersage wichtigen Merkmalen, zu einem erhöhten Fehler, da das Modell die Beziehung zwischen diesen Merkmalen und der Zielvariable nicht mehr korrekt erfassen kann. Im Gegensatz dazu hat die Permutation irrelevanter Merkmale nur geringe Auswirkungen auf die Modellleistung. Die Ablationsmethode hingegen eliminiert einzelne Merkmale aus den Testdaten. Wenn ein Merkmal für das Modell von großer Bedeutung ist, verschlechtert dessen Entfernung die Vorhersagegenauigkeit signifikant, während das Entfernen unwichtiger Merkmale nur geringe Effekte aufweist.
Die Integrierten Gradienten

$$IG(x) = (x - x') \int_{\alpha=0}^{1} \frac{\partial F(x' + \alpha(x - x'))}{\partial x} \, dx \qquad (1)$$

bezeichnen ein Verfahren, welches die Gradienten des Modellresultats in Bezug auf die Eingabe entlang eines geraden Pfades von einer neutralen Basiseingabe x_0 bis zum tatsächlichen Eingabewert x berechnet. Dies ermöglicht es einem Merkmal langsam Details hinzuzufügen, bis es seinen tatsächlichen Wert erreicht. Somit kann die Veränderung der Vorhersage aufgrund des Merkmals langsam beobachten werden. Die Aufgabe der Shapley Werte ist es den Beitrag eines Merkmals zum Gesamtergebnis zu quantifizieren, in dem systematisch untersucht wird, wie sich das Resultat verändert, wenn ein Merkmal in die Gruppe der relevanten Merkmale S (= Koalition) aufgenommen wird.
Die Shapley Werte ϕ_i werden durch

$$\phi_i\big((N), v\big) = \sum_{S \subseteq N\{i\}} \frac{|S|!(N-|S|-1)!}{N!} \big(val(S\{i\}) - val(S)\big) \qquad (2)$$

ermittelt. Shapley Werte, ermöglichen eine Zuteilung des Gesamtergebnisses auf die beteiligen Merkmale basierend auf ihren Beitrag innerhalb der Koalition. Die Shapley Werte können auch als gemittelten gewichtete marginalen Beiträge M_i

$$M_i = \big(val(S \cup \{i\}) - val(S)\big) \qquad (3)$$

eines Merkmals betrachtet werden. Formal ist M_i die Differenz zwischen der Modellvorhersage für die Koalition, die das

Merkmal i enthält, $val(S \cup \{i\})$ und der Vorhersage für die Koalition ohne das Merkmal i, $val(S)$ [3]. Aufgrund der $N!$ möglichen Wege wie die Merkmale eine Koalition bilden können, wird diese Methodik durch einen Monte Carlo Ansatz approximiert [4], [5].

$$M_i \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} \Delta\, val_{i,\pi_j} \qquad (4)$$

mit $\Delta v_{i,\pi_j} = val(S \cup \{i\}) - val(S)$. Hierbei ist π_j die j-te Zufallspermutation. Dies führt zwar zu einer erheblichen Verminderung des Ressourcenverbrauchs, dieser Ansatz benötigt für komplexe Modelle z.B. das RNN benötigt dennoch viel Rechenleistung.
Um die Methoden zu bewerten, wird dem Datensatz eines weiteres Merkmal „NonImpact" in Form von weißem Rauschen hinzufügt. Dieses ist korreliert mit allen Merkmale und dem Ausgang unkorreliert und muss für das Netzwerk immer vernachlässigbar sein.
Um die Wichtigkeit der Neuronen innerhalb des Netzwerks zu werden dessen Aktivierungen und Gewichte extrahiert und, aber auch durch Ablation analysiert.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Zuerst wird ein mehrschichtiges Perzeptron (Multi Layer Perzeptron MLP) mit 12 verdeckten Neuronen und einer ReLU Aktivierungsfunktion und ein rekurrentes Netzwerk mit 9 verdeckten Neuronen trainiert, siehe Abb. 1 und Abb. 2.

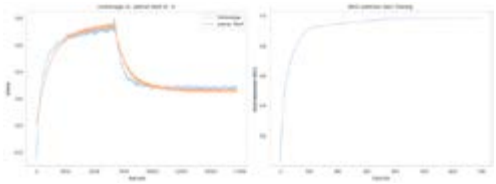


Abb. 1: a) Vergleich MLP-Modellausgang und dem Messwert

b) Entwicklung des $\boldsymbol{MSE_{norm}}$

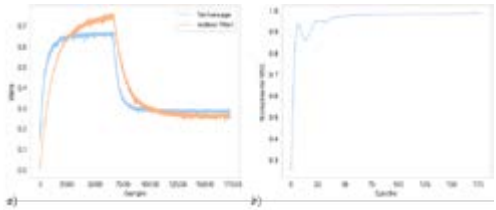


Abb. 2: a) Vergleich MLP-Modellausgang und dem Messwert

b) Entwicklung des $\boldsymbol{MSE_{norm}}$

wobei der MSE durch

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i' - y_i)^2 \qquad (5)$$

definiert ist. Im MSE_{Norm} ist erkennbar, dass das RNN einen schnelleren, aber instabileren Trainingsverlauf zeigt. Im nächsten Schritt werden die zuvor genannten Methoden angewandt.
Zuerst wurde die Wichtigkeit der einzelnen Neuronen Korrelationsanalyse untersucht. Danach werden die Eingangsgrößen der Netzwerke mittels Ablation, Integrierte Gradienten und Shapley Werte (Monte Carlo Approximation) bewertet.

5. ERGEBNISSE

Aufgrund der durchgeführten Analyse konnte für das MLP die in Tab. 1. gezeigten Neuronen und Merkmale als vernachlässigbar erkannt werden

Neuronen	Merkmale
1, 2, 4, 8	uq, iq, ud, coolant, NonImpact

Tab. 1: Vernachlässigbare Merkmale und Neuronen des MLPs

Anhand dieser Informationen wird eine Ablation durchgeführt, siehe Abb. 3.

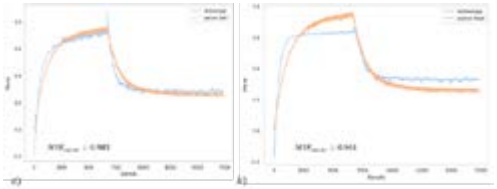


Abb. 3: a) Vorhersage vor der Optimierung (MLP)

b) Nach der Optimierung (MLP)

Es ist ersichtlich, dass die Modellvorhersage einen deutlichen Leistungsverlust einbüßt. Dieser kann jedoch durch ein erneutes Training kompensiert werden.
In Tab. 2. werden die Neuronen und Merkmale aufgelistet, welche im RNN entfernt wurden.

Neuronen	Merkmale
1, 3	ambient, coolant, motor_speed, NonImpact

Tab. 2: Vernachlässigbare Merkmale und Neuronen des RNN

Die Ergebnisse der Optimierung des rekurrenten Netzes (RNN) anhand er gewonnen Informationen wird in Abb. 4 abgebildet.

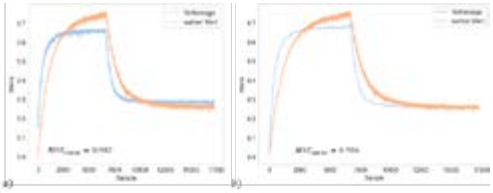


Abb. 4: a) Vorhersage vor der Optimierung (RNN)

b) Vorhersage vor der Optimierung (RNN)

Deutlich ist erkennbar, dass sich die Modellvorhersage kaum verschlechtert, sondern im Gegenteil nach der Optimierung weniger Rauschen besitzt.
Mit beiden Optimierungen wird validiert, dass die untersuchten Algorithmen funktionieren, die Ergebnisse der beiden Netzwerke unterscheiden sich. Dies ist nicht verwunderlich, da MLP und RNN keine realistischen Modellvorhersagen liefern.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde ein mehrschichtiges Perzeptron (MLP) und ein rekurrentes Neuronalen Netz (RNN) zur Schätzung der Rotortemperatur trainiert. Hierfür wurde ein Temperaturdatensatz der Universität Paderborn verwendet [3]. Nach dem Training der Netzwerke wurden die Ergebnisse mithilfe aktueller State-of-the-Art-Algorithmen analysiert.
Es zeigt sich eine konsistente Bewertung der Merkmalswichtigkeit für die Modellvorhersagen, was auf eine weitgehende Übereinstimmung der methodischen Ansätze hindeutet. Die in der Arbeit präsentieren Algorithmen sind funktionsfähig, besitzen jedoch noch Ausbaupotential. Ein Hindernis ist die Limitierung durch Hardware, da somit beispielsweise die Shapley Werte nur approximiert werden können. Es werden aber einige Informationen über die Aktivierungen und das Verhalten der Neuronen innerhalb des Netzwerks gefunden.
Die durchgeführte Optimierung zeigt, dass die Informationen über die Merkmale und Neuronen zur Effizienzsteigerung der Netzwerke nützbar sind. Dabei wird auf ein erneutes Training der Netzwerke verzichtet, obwohl dies die übrigen Parameter feinabstimmt und die Modellleistung weiter erhöht.
Es konnte nachgewiesen werden, dass es Werkzeuge gibt, die das Verständnis für die Netzwerktopologien verbessern. Dieses Verständnis bezieht sich jedoch rein auf die „Wichtigkeit" der Merkmale und Neuronen innerhalb der Netzwerke. Außerdem ist der Modellausgang rein statistischer Natur und hat keinen Bezug zur Physik. Für technische Aufgabenstellungen ist es daher ratsam, Physical Informed Neural Networks (PINNs) zu verwenden, da diese die physikalischen Eigenschaften des Datensatzes in Form von Differentialgleichungen einbeziehen können. Eine allgemeine Erklärung der Entscheidungsfindung der Netzwerke konnte nicht gefunden werden, da die hierfür nötigen Methoden noch nicht entwickelt wurden. Die Entwicklung dieser würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] A. Turing, „COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE," *Mind, Volume LIX, Issue 236,* p. 433–460, 01 October 1950.

[2] B. . Y. Zhao , H. Zheng, J. Cryan, B. Viswanath und Y. Yao, „Automated Crowdturfing Attacks and Defenses in Online Review Systems," 8 September 2017. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1708.08151v2. [Zugriff am 23 Mai 2024].

[3] M. Sundararajan, A. Taly und Q. Yan, „Axiomatic Attribution for Deep Networks," [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1703.01365.

[4] S. S. Fatima, „A linear approximation method for the Shapley value," *Artificial Intelligenc,* Bd. Volume 172, Nr. Issue 14, pp. 1673-1699, 2008.

[5] R. Mitchell, J. Cooper, E. Frank und G. Holmes, „Sampling Permutations for Shapley Value Estimation," *Journal of Machine Learning Research 22,* 2021.

[6] O. W. J. B. Wilhelm Kirchgässner, „Electric Motor Temperature," 26 04 2021. [Online]. Available: https://www.kaggle.com/dsv/2161054. [Zugriff am 22 01 2023].

NINA SCHMIRL



Nina Schmirl, BSc.

Fachhochschule Wiener Neustadt, Bachgasse 4/5 Pernitz, 06767454015

HAK-Matura 2018, Bachelor-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik" an der FH Wiener Neustadt 2018 bis 2021, Master-Studium „Mechatronik" an der FH Wiener Neustadt seit 2021. „Test Infrastructure Measuring" bei Astotec Automotive GmbH seit 2023

ENTWICKLUNG EINES PRÜFGERÄTES ZUR AUTOMATISIERTEN FUNKTIONSPRÜFUNG VON RELAIS

Kevin Schuh, BSc

Kurzfassung: *Das Ziel dieser Masterarbeit ist es, als Leitfaden für die Entwicklung eines neuen Prüfgerätes zur automatisierten Kontaktzuverlässigkeitsprüfung von Relais der Firma TE Connectivity zu dienen. Im Zuge dieser Masterarbeit sollte ein möglichst modulares Prüfgerät entwickelt werden, dessen Systemkomponenten es ermöglichen, stückweise Adaptierungen an den entwickelten Hard- und Softwarekomponenten vornehmen zu können, um auf Basis dieser Systemplattform weitere Prüfgeräte mit anderen Funktionalitäten zu konzipieren. Das konkrete Bestreben dieser Masterarbeit war es, ein funktionales Prüfgerät zu entwickeln, dessen Hauptaufgabe es ist, die Kontaktzuverlässigkeit von monostabilen sowie bistabilen Relais mit variabler Polstreckenanzahl und Polanordnung messtechnisch zu erfassen.*

Der Fokus dieser Masterarbeit lag auf der Konzeptionierung der elektronischen Modulkomponenten, der neu entwickelten Systemplattform. Die zentrale Aufgabe bestand dabei in der Auslegung und Entwicklung der messtechnischen Komponenten zur Erfassung des Schaltverhaltens der zu prüfenden Relais, inklusive deren Spulenströme sowie der entsprechenden Leistungselektronik zur Ansteuerung der jeweiligen Relaisspulen. Ein weiterer Bestandteil dieser Masterarbeit setzte sich aus der Planung und Programmierung der benötigten Softwarekomponenten zur Ansteuerung der einzelnen Systemkomponenten, Messdatenauswertung und Kommunikationsschnittstellen zur speicherprogrammierbaren Steuerung des zu entwickelnden Prüfgerätes zusammen.

Schlüsselwörter: *Kontaktzuverlässigkeitsprüfung, Relais, Kontaktwiderstand, Kurzschlussdetektion, Schalten induktiver Lasten, Leiterplatte, CAN, SPI, MISRA-C++, EN 61810-7*

1. EINLEITUNG

In den meisten Bereichen der Automatisierungsbranche ist der derzeitige Stand der Technik die Implementierung und Verwendung von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) zur Ablaufsteuerung einzelner oder mehrerer Zellen. Diese Steuerungen haben dabei den Vorteil, dass diese mit standardisierten Feldbusssystemen kommunizieren, wodurch der Datenaustausch von Steuerung zu Steuerung oder zwischen Steuerung und Peripheriemodulen vereinfacht wird. Ebenso können diese Steuerungen mittels Ethernets in ein Netzwerk eingebunden werden und Daten mit diesem austauschen, wodurch sich ein breites Anwendungsspektrum bietet. Die Vorteile einer direkten Netzwerkanbindung sind dabei die erleichterte Diagnosefähigkeit und Wartbarkeit von Anlagen sowie die Möglichkeit, mit einer zentralen oder globalen Datenbank zu kommunizieren.

Für viele Industrieanwendungen ist die Verwendung einer speicherprogrammierbaren Steuerung mit standardisierten Peripheriemodulen zur messtechnischen Erfassung mechanischer Messgrößen ausreichend. Diese Konfiguration stößt jedoch schnell an seine Grenzen, wenn die betrachtete Produktionsanlage elektronische oder elektrische Messgrößen erfassen soll. Die Erfassung von elektronischen oder elektrischen Messgrößen ist stark von der zu betrachtenden Anwendung abhängig, wodurch deren Anforderungen unverhältnismäßigen Variationen unterliegen. Aufgrund der stark variierenden Anforderungen gibt es keine einheitliche Lösung zur messtechnischen Erfassung aller anwendungsspezifischen elektronischen und elektrischen Systemgrößen, wodurch die dafür benötigte Hardware nicht in großen Stückzahlen gefertigt werden kann und eine Produktion dieser daher für viele Hersteller unrentabel ist. Aus diesem Grund obliegen die Entwicklung und Implementierung anwendungsspezifischer Prüfgeräte zur messtechnischen Erfassung von elektronischen und elektrischen Messgrößen meistens dem Kunden selbst, welcher diese Prüfgeräte in seinen Anlagen implementieren möchte.

Das bestehende hausintern entwickelte Prüfgerät zur automatisierten Kontaktzuverlässigkeitsprüfung von Relais wurde bereits vor vielen Jahren entwickelt und besteht aus reinen digitalen Logikbausteinen. Die Selektion, ob ein Relais den Prüfanforderungen entspricht oder nicht, erfolgt dabei über die Schaltschwellen der einzelnen Logikbausteine und deren hardwaremäßigen Verdrahtung. Eine Änderung des Prüfablaufes oder der Schwellwerte der Selektion ist daher nur durch eine Hardwareänderung möglich, wodurch sich das Gesamtsystem nur eingeschränkt an variierende Anforderungen adaptieren lässt. Zusätzlich ist die Assemblierung des derzeitigen Prüfgerätes sehr zeitaufwendig und fehleranfällig, da jede Messleitung und Versorgungsleitung händisch verlötet und auf der Geräterückwand ausgeführt werden muss. Im Zuge dieser Masterarbeit sollte daher ein neues Prüfgerät zur automatisierten Kontaktzuverlässigkeitsprüfung konzipiert, entwickelt, aufgebaut und in einer bestehenden Anlage getestet werden. Dabei sollte ein möglichst modulares Prüfgerät entwickelt werden, dessen Systemkomponenten es ermöglichen, stückweise Adaptierungen an den entwickelten Hard- und Softwarekomponenten vornehmen zu können, um auf Basis dieser Systemplattform weitere Prüfgeräte mit anderen Funktionalitäten zu konzipieren.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Diese Masterarbeit soll als Leitfaden für die Entwicklung eines neuen Prüfgerätes zur automatisierten Kontaktzuverlässigkeitsprüfung von Relais der Firma TE Connectivity dienen. Dabei sollten alle notwendigen Schritte, welche zur Entwicklung des Prüfgerätes notwendig waren, dokumentiert und näher erläutert werden. Die ausführliche Dokumentation der einzelnen Systemkomponenten sowie der dazugehörigen Entwicklungsschritte stellte einen wesentlichen Bestandteil dieser Masterarbeit dar, um den Entwicklungsprozess so nachvollziehbar wie möglich zu gestalten und die zukünftige Wartbarkeit des Prüfgerätes zu garantieren.

Die Grundlage dieser Masterarbeit ist ein bereits bestehendes Prüfgerät, welches vor vielen Jahren entwickelt wurde und im Zuge eines Produktionsausbaus für den Einsatz in einer neuen Fertigungsstraße modernisiert werden sollte. Die Modernisierung des bestehenden Prüfgerätes war deshalb notwendig, da das alte Design erhebliche Schwachstellen aufweist und die neuen Prüfanforderungen nicht mehr zufriedenstellend erfüllen kann. Das alte Design besteht dabei aus reinen digitalen Logikbausteinen, und dessen Selektion erfolgt daher ausschließlich über deren hardwaremäßige Verdrahtung. Eine Veränderung des Prüfablaufes oder der Schwellwerte der Selektion ist daher nur eingeschränkt durch eine Hardwareänderung möglich. Aufgrund des komplexen Aufbaus des Prüfgerätes ist zusätzlich ein erhöhter Assemblierungsaufwand zur Fertigung eines Prüfgerätes notwendig. Ebenso neigt das bereits bestehende Prüfgerät zu thermischen Problemen bei der Erzeugung der Kontaktlast, welche zur Validierung der Kontaktzuverlässigkeit benötigt wird.

Ausgehend von den bereits gesammelten Erfahrungen und Erkenntnissen des bestehenden Prüfgerätes, war das Ziel dieser Masterarbeit eine komplette Neuentwicklung des bestehenden Prüfgerätes unter Einbeziehung der Systemgrenzen zur SPS. Im Zuge dieser Masterarbeit sollte ein möglichst modulares Prüfgerät entwickelt werden, dessen Systemkomponenten es ermöglichen, stückweise Adaptierungen an den entwickelten Hard- und Softwarekomponenten vornehmen zu können, um auf Basis dieser Systemplattform weitere Prüfgeräte mit anderen Funktionalitäten zu konzeptionieren. Das konkrete Ziel dieser Masterarbeit ist es, ein funktionales Prüfgerät zu entwickeln, dessen Hauptaufgabe es ist, die Kontaktzuverlässigkeit von monostabilen sowie bistabilen Relais mit variabler Polstreckenanzahl und Polanordnung messtechnisch zu erfassen. Der Fokus dieser Masterarbeit liegt dabei auf der Auslegung und Entwicklung der messtechnischen Komponenten zur Erfassung des Schaltverhaltens der zu prüfenden Relais, inklusive deren Kontaktübergangswiderständen und Spulenströme sowie der entsprechenden Leistungselektronik zur Ansteuerung der jeweiligen Relaisspulen. Ein weiterer Bestandteil dieser Masterarbeit setzt sich aus der Planung und Programmierung der benötigten Softwarekomponenten zur Ansteuerung der einzelnen Systemkomponenten, Messdatenauswertung und Kommunikationsschnittstellen zur SPS des zu entwickelnden Prüfgerätes zusammen.

3. GRUNDLAGEN

Das Gesamtsystem des Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerätes setzt sich aus mehreren einzelnen Modulen zusammen. Durch den modularen Systemaufbau wird erreicht, dass stückweise Adaptierungen an Hard- und Softwarekomponenten vorgenommen werden können, ohne, dass komplexe Änderungen durchgeführt werden müssen. Der modulare Systemaufbau ermöglicht ebenso eine Reduktion des Assemblierungsaufwands, da die einzelnen Module steckbar und verpolungssicher ausgeführt sind, wodurch jegliche Verdrahtung sowie potenzielle Fehlerquellen entfallen. Die Reduktion des Assemblierungsaufwands führt ebenso zu einer Reduktion der benötigten Fertigungsstunden für ein Prüfgerät, durch deren Einsparung ein wirtschaftlicher Vorteil für das Unternehmen entsteht.

Das Gesamtsystem des zu entwickelnden Prüfgerätes ist in Abb. 1 dargestellt und setzt sich im Wesentlichen aus der SPS, den Netzgeräten, der Ansteuerelektronik und dem Mikrocontroller-Board zusammen. Als SPS wird in dem zu entwickelnden Prüfgerät ein Beckhoff Programmable Logic Controller (Beckhoff PLC) verbaut, welcher an eine zentrale Datenbank angeschlossen ist und über diese die Prüfvorschrift sowie die Schwellwerte der einzelnen Relais abruft. Der Beckhoff PLC agiert dabei als Master und ist für die Ansteuerung der beiden Netzgeräte sowie für die Kommunikation mit dem Mikrocontroller zuständig. Grundsätzlich ist für die Prüfung von monostabilen Relais nur Netzteil 1 erforderlich, Netzteil 2 wird ausschließlich zur Prüfung von bistabilen Relais benötigt. Der Beckhoff PLC kommuniziert mit dem Mikrocontroller durch das Controller Area Network Protokoll (CAN-Protokoll). Der Mikrocontroller ist dabei mit einem CAN-Koppler verbunden, welcher die Daten mittels Ethernet for Control Automation Technology (EtherCAT) an den Beckhoff PLC weiterleitet. Das Mikrocontroller-Board besitzt in der derzeitigen Ausführung zwei getrennte CAN-Interfaces, ersteres ist direkt in den Mikrocontroller implementiert, zweiteres steht extern mittels Serial Peripheral Interface Anbindung (SPI-Anbindung) zur Verfügung. Grundsätzlich wird für die Funktionalität des Prüfgerätes nur ein CAN-Interface benötigt. Um sich für zukünftige Entwicklungsphasen alle Optionen offen zu halten, wurde sich für die Implementierung eines zweiten CAN-Interfaces entschieden.

Der Mikrocontroller stellt die zentrale Steuerungseinheit des Prüfgerätes dar und ist für die Ausführung des Prüfprozesses verantwortlich, welcher durch den Beckhoff PLC getriggert wird. Das Mikrocontroller-Board generiert dabei die notwendigen Steuersignale zum Ansteuern der Kontaktanschaltung. Die Spulenanschaltung ist für die Versorgung des Prüflings zuständig, welche die von der Spulenanschaltbrücke erzeugte Vorwärtsspannung oder Umkehrspannung an den Prüfling anlegt. Wenn die Spulenanschaltung aktiv ist, wird die Relaisspule mit Spannung versorgt und erzeugt im Falle der Vorwärtsspannung ein magnetisches Feld, welches den Anker anzieht, das Relais schaltet durch. Die Kontaktanschaltung ist für die Generierung der Kontaktlast zuständig, da alle Relaiskontakte firmenintern unter Last getestet werden, um repräsentativere Messergebnisse zu erhalten. Durch die Kontaktlast entsteht ein Stromfluss über die geschalteten Relaiskontakte, welcher wiederum einen Spannungsabfall verursacht. Dieser Stromfluss sowie der daraus resultierende Spannungsabfall können messtechnisch mithilfe der Kontaktauswertung erfasst und vom Mikrocontroller verarbeitet werden. Der Mikrocontroller überprüft bei der Verarbeitung der Messwerte, ob die gemessenen Parameter innerhalb der vorab definierten Schwellwerte liegen und übermittelt die Ergebnisse der Messung anschließend an den Beckhoff PLC. Die übermittelten Ergebnisse der Messung werden anschließend von dem Beckhoff PLC gesammelt und für die grafische Visualisierung an einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (engl. Human Machine Interface) (HMI) aufbereitet.

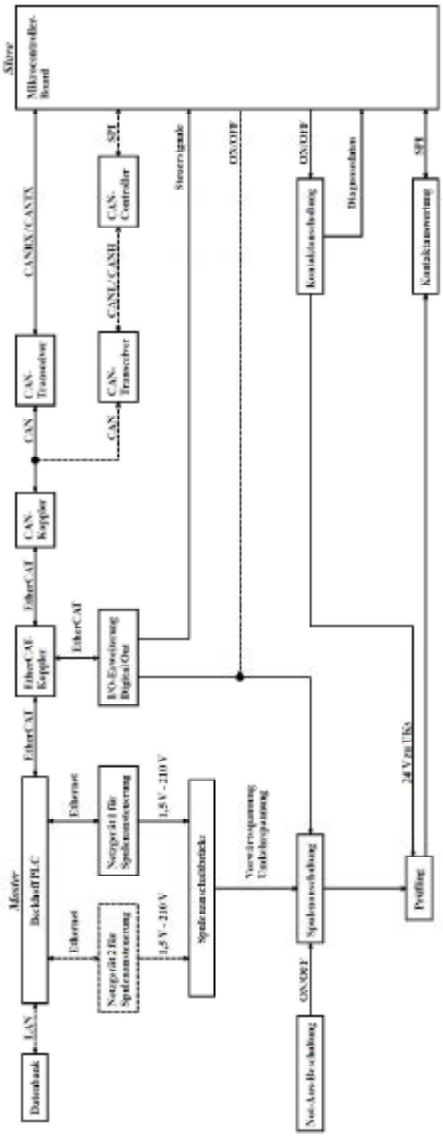


Abb. 1: Blockschaltbild des allgemeinen Systemaufbaus mit Visualisierung der Systemschnittstellen und dessen Steuerleitungen

4. PRAKTISCHE UMSETZTUNG

Das Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerät setzt sich abseits der mechanischen Komponenten aus mehreren einzelnen Modulen zusammen. Das entwickelte Prüfgerät besteht dabei aus den folgenden Modulen, welche jeweils aus einer eigenen Leiterplatte (engl. Printed Circuit Board) (PCB) bestehen:

- Mikrocontroller-Board
- Messeinschubkarte
- Spulenanschaltung
- Backplane
- Programmieradapter
- Prüfplatine

Das Mikrocontroller-Board ist abseits der SPS das Herzstück des gesamten Prüfgerätes, denn dieses beherbergt den Mikrocontroller, welcher für die Ausführung des Prüfprozesses verantwortlich ist. Der Mikrocontroller übernimmt dabei die Kommunikation mit den Analog-Digital-Wandlern (engl. Analog-Digital-Converter) (ADC) auf der jeweiligen Messeinschubkarte und ist für die Auswertung der Messdaten verantwortlich. Zusätzlich kommuniziert der Mikrocontroller mit der Beckhoff PLC über das am Mikrocontroller-Board implementierte CAN-Interface und ist für die Generierung der einzelnen Steuersignale verantwortlich.

Die einzelnen Steuersignale sowie die Datenleitungen zu den ADCs werden über spezielle Industriekonnektoren auf die Messeinschubkarte geleitet. Ein Prüfgerät besteht dabei aus einer beliebigen Anzahl an Messeinschubkarten, auf welchen je ein Mikrocontroller-Board angebracht ist. Die Anzahl der Messeinschubkarten hängt von den Anforderungen der zu prüfenden Relais ab, da pro Messeinschubkarte maximal acht Polstrecken überprüft werden können. Der Aufbau einer Messeinschubkarte besteht im Wesentlichen aus den ADCs zur Digitalisierung der einzelnen Relaischarakteristiken und der Kontaktanschaltung zur Steuerung der für die Prüfung der Relais erforderlichen Kontaktlast.

Die Spulenansteuerung beherbergt eine Sonderform von Brückenschaltung, welche aus Bipolartransistoren mit isolierten Gate-Elektroden (IGBT) aufgebaut ist, um eine Vorwärtsspannung oder Umkehrspannung mit zwei unterschiedlichen Spannungsversorgungen zu erzeugen. Zur Ansteuerung der IGBTs sind auf dieser Leiterplatte auch die dazugehörigen High-Side Gate-Treiber implementiert, welche zwingend notwendig sind, um die IGBTs sauber anzusteuern und unerwünschtes Durchzünden dieser zu vermeiden.

Alle bereits beschriebenen Leiterplatten sind mit speziellen Industriekonnektoren ausgestattet, welche eine direkte Anbindung an die Backplane ermöglichen. Durch diese direkte Anbindung kann auf die Herstellung und Anbindung mit komplizierten Kabeln verzichtet werden, wodurch sich die Komplexität des gesamten Systemaufbaus drastisch reduziert. Die extern generierten Spannungen werden ebenfalls über Industriekonnektoren zur Backplane geführt und über diese an die einzelnen Leiterplatten verteilt. Alle direkt mit dem Prüfling verbundenen Leiterbahnen werden auf D-SUB-Steckverbinder und HD-SUB-Steckverbinder ausgeführt und mittels Kabel fest mit der Kontaktierung verbunden.

Zur Überprüfung der Funktionalität des Prüfgerätes ist eine eigene Prüfplatine vorgesehen, welche an den D-SUB-Steckverbindern und HD-SUB-Steckverbindern angebracht werden kann, um einen realen Prüfablauf zu simulieren. Die Simulation von realen Prüfabläufen ermöglicht dabei ein effizientes Feintuning der geschriebenen Software und erleichtert das Debuggen im Fehlerfall.

5. ERGEBNISSE

Die Entwicklung des Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerätes erfolgte anhand von zwei gefertigten Prototypen. Die erste Version des Prototypen bestand lediglich aus Testplatinen zur Validierung des Prüfgerätekonzeptes. Nach einer ausgiebigen Testphase des Prüfgerätekonzeptes wurden die identifizierten Designfehler des Prototypen mittels eines Redesign-Zyklus überarbeitet und der in Abb. 2 dargestellte Prototyp gefertigt.

Der in Abb. 2 dargestellte Prototyp zeigt dabei die finalisierte Version des Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerätes, auf deren Basis die aktuelle Version der Prüfgerätesoftware entwickelt und getestet wurde. Die Gesamtfunktionalität des Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerätes wurde anschließend mithilfe der auf den einzelnen Mikrocontrollern ausgeführten Prüfgerätesoftware und einer eigens entwickelten Prüfplatine getestet.

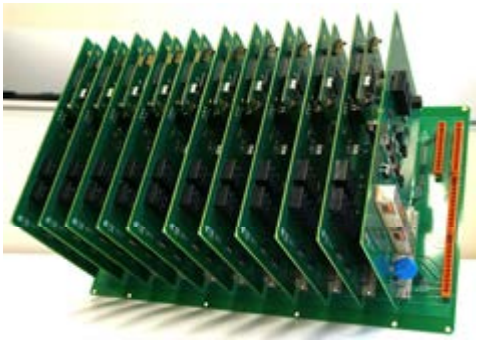


Abb. 2: Darstellung des assemblierten Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerätes mit allen Einschubmodulen und Komponenten

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse dieser Masterarbeit zeigen deutlich, dass das bereits bestehende hausintern entwickelte Kontaktzuverlässigkeitsprüfgerät erfolgreich modernisiert wurde. Durch die durchgeführten Funktionstests konnte gezeigt werden, dass die an das Prüfgerät gestellten Systemanforderungen erfüllt werden. Im Rahmen eines weiteren Entwicklungsprojektes kann der aktuelle Entwicklungsstand aufgegriffen und der Hardwareaufbau der Messeinschubkarte modifiziert werden, wodurch eine genauere Messung der Relaischarakteristiken ermöglicht wird. Durch die Anpassung des Hardwareaufbaus des Prüfgerätes kann dieses in weiterer Folge auch firmenintern als Laborprüfrechner eingesetzt werden kann.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] F. Zach, Leistungselektronik - Ein Handbuch Band 1 / Band 2, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015.

[2] E. Vinaricky, Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen - Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2016.

[3] H. Tschöke, P. Gutzmer und T. Pfund, Elektrifizierung des Antriebsstrangs - Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2019.

[4] L. Stiny, Passive elektronische Bauelemente - Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2019.

[5] J. Specovius, Grundkurs Leistungselektronik - Bauelemente, Schaltungen und Systeme, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2020.

[6] K. Schuh, Softwareentwicklung eines Motor-Controllers zur Sensorgestützten und Sensorlosen Ansteuerung von Bürstenlosen Gleichstrommotoren - Erarbeitung von Health Monitoring und Predictive Maintenance Ansätzen, Graz: FH Joanneum, 2021.

[7] G. Schnell und B. Wiedemann, Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik - Grundlagen, Systeme und Anwendungen der industriellen Kommunikation, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2019.

[8] W. Plaßmann und D. Schulz, Handbuch Elektrotechnik - Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2016.

[9] A. Meroth und P. Sora, Sensornetzwerke in Theorie und Praxis - Embedded Systems-Projekte erfolgreich realisieren, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018.

[10] F. Hüning, Sensoren und Sensorschnittstellen, Berlin: Walter de Gruyter GmbH, 2016.

[11] E. Hering und G. Schönfelder, Sensoren in Wissenschaft und Technik - Funktionsweise und Einsatzgebiete, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018.

[12] E. Böhmer, D. Ehrhardt und W. Oberschelp, Elemente der angewandten Elektronik - Kompendium für Ausbildung und Beruf, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2018.

[13] E-T-A Elektrotechnische Apparate, „Technische Informationen," 20 September 2022. [Online]. [Zugriff am 20 September 2022].

[14] EN 61810-7, Elektromechanische Elementarrelais - Teil 7: Mess- und Prüfverfahren, Brüssel: European Committee for Electrotechnical Standardization, 2006.

[15] Infineon Technologies, „EiceDRIVER 1EDC Compact - Single channel IGBT gate driver IC in wide body package," 14 September 2023. [Online]. [Zugriff am 14 September 2023].

AUTOR



Kevin Schuh, BSc

TE Connectivity Austria GmbH, Schrackstraße 1, 3830 Waidhofen an der Thaya, +43 676 880982947, kevin.schuh@te.com

09/2021 – 02/2024 / FH Wiener Neustadt / Studiengang: Mechatronik / Vertiefung: Mechatronic Systems
10/2018 – 05/2021 / FH Joanneum / Studiengang: Luftfahrt/Aviation
09/2013 – 06/2018 / HTBL Hollabrunn / Abteilung: Elektronik und Technische Informatik

ENTWICKLUNG UND BAU EINES THERMISCH REGULIERBAREN MECHANISCHEN PRÜFSTANDS FÜR KUNSTSTOFFE

Timo Tangel, BSc.

Kurzfassung: *Der FDM - 3D Druck ist eine inzwischen etablierte Technologie zur Herstellung von Prototypen, Einzelteilen und Kleinserien. Ein gewisser Grad an Abfall ist bei diesem Prozess aber unvermeidlich. Da die verwendeten Thermoplaste generell recycelt werden können, bietet sich eine Wiederverwendung als neues Filament an. Dazu sind umfassende Untersuchungen zur Eigenschaftsänderung notwendig. Dies macht einen Prüfstand notwendig, der mechanische, thermische und thermo - mechanische Eigenschaften bestimmen kann. In dieser Arbeit wird ein bestehender mechanischer Prüfstand adaptiert, der diese Anwendung ermöglicht. An Anlehnung an die ISO 527 werden exemplarische Zugprüfungen durchgeführt, die eine korrekte Durchführung in einigen Punkten bestätigt und in anderen widerlegt. Die Arbeit bietet daher experimentell geprüfte Ansätze, wie eine Thermokammer für einen mechanischen Prüfstand gebaut werden kann.*

Schlüsselwörter: *Kunststoffprüfung, Zugprüfung, 3D-Druck, Thermokammer, Recycling*

1. EINLEITUNG

Die additiven Fertigungsverfahren zählen heutzutage zu den etablierten Prototyping - Prozessen. Durch ein immer größeres Umweltbewusstsein rückt auch das Recycling der verwendeten Materialien in den Vordergrund. Bei einem speziellen 3D - Druck Fertigungsverfahren, dem sogenannten Fuse Deposition Modeling (FDM), werden verschiedenste Thermoplaste verwendet. Deren Eigenschaft, durch Hitze plastisch verformbar zu werden und sich bei Abkühlung wieder zu verfestigen, macht es in der Theorie einfach, nicht mehr benötigte gedruckte Bauteile wiederzuverwenden. Allerdings können sich durch wiederholtes Recycling die Werkstoffeigenschaften ändern. Daher müssen Untersuchungen zur Eigenschaftsänderung des recycelten Materials durchgeführt werden. Die Fachhochschule Wiener Neustadt plant daher, einen bestehenden mechanischen Prüfstand anzupassen, um zusätzlich zu den Messgrößen Kraft, Weg und Zeit auch die Temperatur als prüfbaren Parameter zu integrieren.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Im Fokus dieser Arbeit steht die Entwicklung eines thermisch regulierbaren mechanischen Prüfstands, der speziell für die Untersuchung von Kunststoffen konzipiert ist. Die Integration einer Thermokammer in einen bestehenden mechanischen Prüfstand soll es ermöglichen, die mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften von Polymeren unter variablen Temperaturbedingungen zu untersuchen. Dies ist von Bedeutung, da die Verwendung von recycelten Kunststoffen im FDM - Verfahren Einfluss auf die Materialeigenschaften haben kann, was sich folglich auf die Verwendbarkeit und Druckqualität auswirken kann.

3. MATERIALIEN UND METHODEN

Grundlegend bestehen die meisten Kunststoffe aus langen Kohlenwasserstoffketten [1] [2]. Die chemische Zusammensetzung und Struktur dieser Ketten entscheiden über deren Eigenschaften, die Ketten variieren entsprechend stark und eine Vielzahl dieser ist möglich [3].
Eine Einteilung von Polymeren kann durch ihr thermisch - mechanisches Verhalten in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere erfolgen. Für diese Arbeit sind Thermoplaste von besonderem Interesse, da für das Filament im FDM - 3D - Druck diese zur Anwendung kommen.

Die Kunststoffprüfung als übergeordnetes Ziel ist durch eine Vielzahl von Normen bestimmt.
Die ISO 527 Teil 1 und Teil 2 gibt Auskunft über standardisierte Zugprüfungen für Kunststoffe. Dies umfasst alle Anforderungen an das Prüfmittel, die Definition von Parametern und wie diese gegebenenfalls berechnet werden. Des Weiteren werden Randbedingungen wie Klimata beschrieben und zuletzt die Geometrie von Prüfkörpern definiert, siehe Abbildung 1 bzw. Tabelle 1 [4] [5]. Der Probekörper Typ 1A wird in dieser Arbeit für Auslegung und Prüfung verwendet.

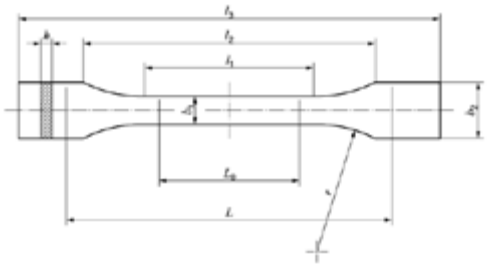


Abbildung 1 - Probekörper Typ 1A und Typ 1B [5]

Tabelle 1 - Maße der Probekörpertypen 1A und 1B [5]

	Probekörpertyp	**1A**	**1B**
l3	Gesamtlänge	170	≥ 150
l1	Länge des engen parallelen Teils	80 ± 2	60 ± 0,5
r	Radius	24 ± 1	60 ± 0,5
l2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	109,3 ± 3,2	108 ± 1,6
b2	Breite an den Enden	20,0 ± 0,2	
b1	Breite des engen Teils	10,0 ± 0,2	
h	Bevorzugte Dicke	4,0 ± 0,2	
L0	Messlänge (bevorzugt)	75,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
L0	Messlänge (zulässig)	50,0 ± 0,5	50,0 ± 0,5
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1	115 ± 1

Die wichtigsten Bestandteile einer Zugprüfmaschine sind Gestell, Traverse, Probenhalter, Kraftsensor und Extensometer (Längenmesseinrichtung), siehe Abbildung 2.



Abbildung 2 - Zugprüfmaschine mit Bezeichnung wichtiger Komponenten

Nicht jede Zugprüfmaschine besitzt eine Traverse. Der Begriff hat eine gewisse Bedeutung, da der Verfahrensweg der Maschine als Traversenweg bezeichnet wird, auch wenn diese keine Traverse besitzt. Aus wirtschaftlichen Gründen kann in diesem Projekt kein genaues Extensometer verwendet werden, stattdessen wird der Traversenweg benutzt.

Der bestehende Prüfstand der Fachhochschule Wiener Neustadt ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt.

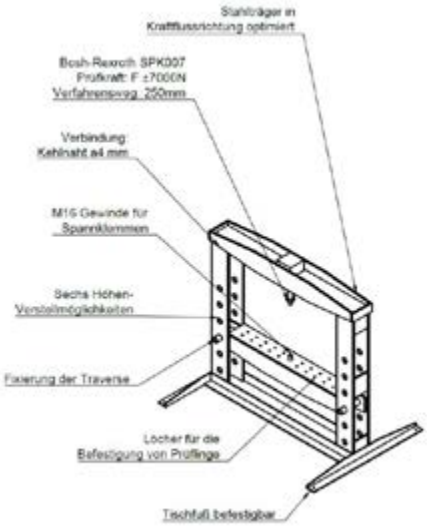


Abbildung 3 - Gestell 3D - Ansicht

Der Prüfstand besteht aus einem sondergefertigten Gestell, bei dem eine über Bolzen stufenverstellbare untere Traverse den Abstand zwischen Translationswerkzeug und Prüfobjekt verändern kann. Die Maschine weist keine Traverse zur Prüfbewegung auf, stattdessen übernimmt diese Aufgabe ein elektromechanischer Stempel.
Dieses System ist ein Bosch Rexroth Presskit, welches eigentlich zur Automatisierung in der Fertigung konzipiert ist. Es besteht grundlegend aus einer Kugelgewindespindel, welche durch einen Servo angetrieben wird, die Steuerung dessen übernimmt eine vorkonfigurierte SPS, welche zur Verwendung über ein lokales Netzwerk und einem Webbrowser angesprochen wird. Die technischen Daten sind in Tabelle 2 abgebildet.

Tabelle 2 - Spezifikationen Presskit der Größe 007

1	Verfahrweg (mm)	250
2	Nennkraft (kN)	7
3	Maximalkraft (kN)	10
4	Max. Geschwindigkeit (m/s)	0,55
5	Wiederholgenauigkeit (mm)	± 0,01

Als Kraftsensor kommt ein U9C/10kN zum Einsatz. Dieser wird mit einem entsprechenden Verstärker betrieben, welcher eine Spannung von 0 V - 10 V ausgibt, das Nullsignal liegt bei 5 V. Bei 3 Kommastellengenauigkeit ergibt sich eine Messgenauigkeit von 2 N.

Es gäbe eine Vielzahl von Parametern, die für Anforderungen an eine Thermokammer für die Zugprüfmaschine in Frage kommen würden. Praktisch sind viele Eigenschaften durch äußere Umstände bereits definiert. Die Weglänge des Systems ist durch den elektromechanischen Zylinder mit 250 mm vorbestimmt. Ebenso gilt dies für die Weglängenmessung über den Traversenweg mit einer Genauigkeit von 0,01 mm, die aufbringbare Prüfkraft mit einem Maximum von 10 kN sowie die Prüfgeschwindigkeit von 550 mm/s. Die Ausmaße einer möglichen Thermokammer sind durch das Gestell eingeschränkt, die Höhe mit maximal 533 mm und die Breite mit 600 mm, für die Tiefe existiert theoretisch keine Einschränkung.

Als Parameter, welche definierbar sind, wird die Temperatur, Heizrate und Luftfeuchte verwendet. Anforderungen an den Probenhalter sind gesondert nach den Anforderungen an die Thermokammer beschrieben. Diese sind in Tabelle 3 zu betrachten.

Tabelle 3 - Definition Anforderungsparameter

Parameter	Optimal	Geplant	Minimal
Temperatur	-80 °C bis 360 °C	-40 °C bis 200 °C	-20 °C bis 120 °C
Heizrate	> 120 °C/h	120 °C/h	50 °C/h
Luftfeuchte	Kammer regulierbar	Kammer messbar	Raum messbar

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Zusätzlich zur Thermokammer muss ein Probenhalter entwickelt und gebaut werden. Dieser wird in erster Instanz auf die Verwendung von Zugproben nach ISO 527-2 Typ A eingeschränkt. Der Probenhalter muss grundlegend gewährleisten, dass die Zugproben nicht verrutschen und entsprechend ausgerichtet sind. In Abbildung 4 ist eine 3D - Ansicht des zusammengebauten Probenhalters abgebildet.

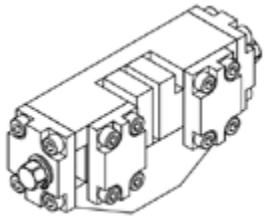


Abbildung 4 - Probenhalter - Baugruppe 3D Ansicht

Die Baugruppe der Thermokammer ist in Untergruppen unterteilt:

- Temperiereinheit
  - Peltier - Element
  - Temperatur - Messung, Steuerung und Regelung
  - Universalblock
  - Monoblock
- Thermokammer - Prototyp
- Innengehäuse V1
- Innengehäuse V2

Die Temperiereinheit ist als Baugruppe zu betrachten, die universell in jedem Bauraum (der die Platzanforderungen erfüllt) eingesetzt werden kann. D.h. diese Einheit umfasst Kühl - und Heizelemente, deren Ansteuerung und Regelung, die Messung von Temperaturen und Luftfeuchte, die Verteilung der Kälte oder Wärme im Prüfraum und die Abfuhr von Abwärme an die Umgebung.

Der optimale Betriebspunkt wird durch eine Reihe von Messungen unterschiedlicher Spannungen an den kaskadierten PLT - Elementen bestimmt.
Ein optimales Spannungsverhältnis wird durch eine polynomiale Flächenanpassung gefunden. Durch das Plotten dieser Fläche als Konturdarstellung und 3D - Darstellung kann ein Betriebspunkt von 8,5 V - 9 V (PLT 1) beziehungsweise 20 V (PLT 2) für das System abgelesen werden, siehe Abbildung 5.

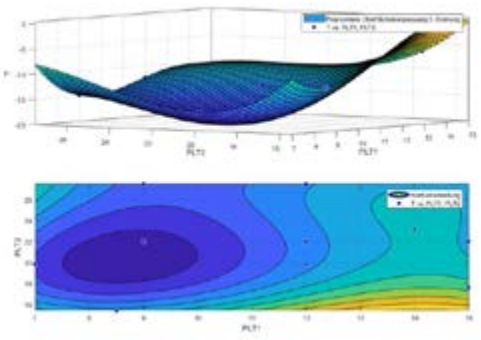


Abbildung 5 - Polynomiale Flächenanpassung - 3D - Plot & Konturplot

Zur Temperaturmessung kommt ein PT1000 Temperaturfühler zum Einsatz. Da die Widerstandsänderung eines PT1000 entsprechend gering ausfällt und der Messstrom auf 50 mA begrenzt sein muss (Eigenerwärmung), ist eine entsprechende Messverstärker - Schaltung mit zuvorliegendem Spannungsteiler, ausgeführt als H - Brücke, notwendig.

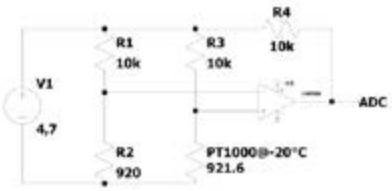


Abbildung 6 - Verstärkerschaltung PT1000

Der Messverstärker ist als Differenzenverstärker ausgeführt, als Vergleichsspannung dient der Spannungsteiler $\frac{R1}{R2}$. Der Spannungsteiler $\frac{R3}{PT1000}$ bildet bei einer Temperaturänderung eine entsprechende Spannungsdifferenz, welche verstärkt wird und somit digitalisiert werden kann. Der Widerstand R2 ist so gewählt, dass theoretisch bei -20 °C der Nullpunkt des Verstärkers liegt, also keine Differenzspannung existiert, da $\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{PT1000}$ gilt. Dieser Umstand ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die Umrechnung zur Temperatur erfolgt direkt aus dem Bitwert (Mittelwert aus 10 Punkten über 1 Sekunde) des ADCs, dazu ist ein Thermometer (Fluke 54 II B) notwendig, das eine Temperatur zu einem jeweiligen Bitwert angibt. Die Messpunkte werden mittels Matlab und polynomialer Kurvenanpassung zu einer linearen und quadratischen Funktion interpoliert. Die quadratische Funktion weicht erst im höheren Temperaturbereich von der linearen deutlich ab. Es wird daher die lineare Funktion verwendet, praktische Tests bestätigen diesen Umstand.
Die lineare Funktion mit Koeffizienten lautet:

$$y_{linear} = 0{,}24 \cdot x - 44{,}81 \quad (1)$$

Zur Steuerung kommt ein Arduino Nano zum Einsatz. Dieser ist einer der „schwächsten“ Microcontroller der Arduino - Familie, da jedoch nur sehr wenige Operationen auszuführen sind, wird dieser als ausreichend eingeschätzt. Zur einfacheren Verwendbarkeit und besseren Kontaktierung wird dieser gemeinsam mit einem "`Screw Terminal Adapter"' verwendet. Die Stromversorgung erfolgt über USB, daraus resultiert eine kleinere Spannung am 5 V Ausgang von ca. 4,7 V. Dies stellt bei diesem Projekt kein Problem dar.
Zusätzlich zu 2 Stück PT1000 wird ein DHT22 Temperatur- und Luftfeuchtefühler zur Messung der Raumluft verwendet. Das Schalten der PLT - Elemente erfolgt über 2 Stück Solid State Relays, ein Umschalten zwischen Heizen und Kühlen erfolgt durch einen zweipoligen Wechselschalter.

Der Programmablauf wird folgend punktuell beschrieben:

- Initialisierung: Einbinden aller Bibliotheken und Definition von Variablen
- Berechnen der Temperatur: 50 Messwerte aufsummieren und Durchschnitt bilden, mit linearer Funktion aus Formel 2 aktuelle Temperatur berechnen
- Sicherheitsabschaltung: wenn aktuelle Temperatur Wert überschreitet, dann Relay - Abschaltung und System in Endlosschleife
- Regelung: durch Außentemperatur entscheiden Kühlen oder Heizen, Regelung durch 2 - Punkt Regler

Der „Universalblock“ (Abbildung 7) beschreibt den Verbau der PLT - Elemente in eine vollständige Kühl- und Heizeinheit. Zur Abführung der Abwärme wird eine CPU - Wasserkühlung zweckentfremdet. Diese wird auf einem Kupferblock mit einer gefederten Schraubverbindung montiert, dazwischen liegen die PLT - Elemente. Zur besseren Wärmeübertragung kommt eine Wärmeleitpaste von 10 W/(m K) zum Einsatz.
Die andere Seite des Kupferblocks weist eine zentrische M6 Gewindebohrung auf. Diese dient zur Montagemöglichkeit eines Kühlkörpers, der die Kälte oder Wärme innerhalb der Kammer abgeben kann. Tests haben die Notwendigkeit eines zusätzlichen Lüfters im Prüfraum ergeben, ein einfaches 50mm Modell erfüllt diesen Zweck.

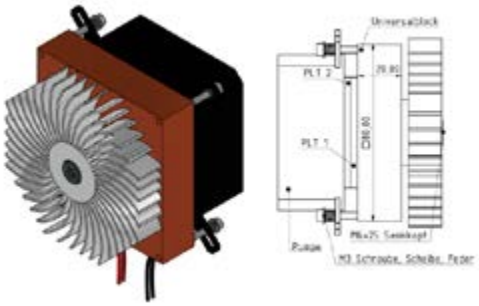


Abbildung 7 - Baugruppe Universalblock 3D Ansicht & Ansicht

Da die Lösung des Universalblocks in bestimmten Fällen suboptimal ist, wird eine zweite Variante aus einem Kupferblock gefräst, in dem entsprechende Lamellen zum Heizen oder Kühlen bereits enthalten sind. Diese Variante ist des Weiteren deutlich leichter und einfacher handzuhaben. Der sonstige Aufbau ist mit dem des Universalblocks ident. Auch diese Variante kommt nicht ohne Lüfter (92 mm) im Innenraum aus, um eine entsprechende Temperatur zu erreichen.
Die Abbildung 8 zeigt Aussehen und Aufbau dieser Varianten.

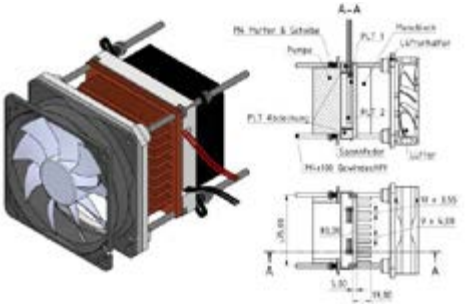


Abbildung 8 - Baugruppe Monoblock 3D Ansicht & Ansicht mit Schnittdarstellung

Die Thermokammer selbst ist zuerst als einfache Kammer ausgeführt und wird dann nach Bedarf durch ein Innenleben erweitert.

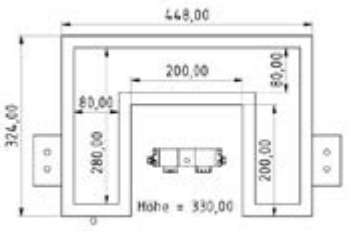


Abbildung 9 - Thermokammer - Prototyp Außengehäuse Ansicht Maßskizze, Tür ausgeblendet

Das Außengehäuse dient technisch dazu, die Dämmung an Ort und Stelle zu halten und eine Möglichkeit den Prüfraum zu schließen und zu öffnen. Eine Öffnung zur Durchführung der Temperiereinheit ist des Weiteren notwendig.
Geplant ist ein Prototyp zur Systemtestung und Zugprüfungen zur Testung eines Prüfablaufs. Eine zweite Ausbaustufe zu einer voll ausgebauten Thermokammer, die mehr als das absolut technisch notwendige erfüllt, ist aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen nicht möglich.

Es wird eine Dämmung aus Steinwolle mit 80 mm Dicke verwendet. Diese befindet sich zwischen Außen- und Innenwänden der Kammer sowie in der Tür. Als Plattenmaterial werden 22 mm OSB - Holzplatten verwendet. Diese sind einfach zu verarbeiten und können ohne Weiteres durch Spanplattenschrauben verbunden werden. Technisch sind die Platten mit diesem Projekt kompatibel und problemlos einsetzbar.

Da die Prototyp - Kammer generell ihre Funktion erfüllt, wird diese weiter ausgebaut, in dem ein Innengehäuse aus 3D - gedruckten Teilen erstellt wird.
Als Filament ist ein Polymer notwendig, dass einer höheren Temperaturbelastung standhält und noch mit Druckern wie Prusa I3 oder Prusa XL verarbeitet werden kann. Ein Material, das diese Anforderungen erfüllt, ist Greentec Pro von Extrudr. Eine VST von 160 °C wird für diesen Aufbau als ausreichend angesehen. Die geringere HDT von 115 °C wird nicht als problematisch angesehen, da auf dem Gehäuse nahezu keine Belastung wirkt. Gleichzeitig kann das Filament bei ähnlichen Bedingungen wie PLA verarbeitet werden, was es optimal für diesen Anwendungsfall macht.

Minimal wird der temperierte Bereich dadurch, dass nur der notwendige Prüfbereich der Probe klimatisiert wird. Es wird angenommen, dass durch die schlechte Wärmeleitung von Kunststoff sowie dem geringen Querschnitt des Prüflings der Klemmbereich als auch der Übergang zum Prüfbereich nicht klimatisiert sein müssen. Die Abtrennung übernimmt die Dichtplatte vor den Probenhaltern, durch dieses wird die Probe entsprechend geführt. Bei einer Prüfung verfährt die Dichtplatte entsprechend mit dem Probenhalter nach oben.
Der untere Teil ist durch einen fixen hinteren Block und einen vorderen, entfernbaren unterteilt, dieses Bauteil wird als Verschlussstück bezeichnet. Der hintere Teil dient als Basis für Aufbauten wie Lüfter oder Sensoren, der vordere hingegen muss herausnehmbar sein, um an den Probenhalter zu gelangen und eine Probe spannen zu können.



Abbildung 10 - Perspektivische Ansicht Innenkammer V1 - mit Verschlussstück

Die zweite Version des Innengehäuses (Abbildung 11) entspringt der Notwendigkeit, dass bei Versuchen im erhöhten Temperaturbereich (über Raumtemperatur) alle Zugversuche fehlschlagen, da die Proben im Schenkelbereich reißen und somit nicht gewertet werden dürfen. Es wird angenommen, dass die Temperaturdifferenz zwischen Probenhaltern und temperierter Innenkammer eine Sollbruchstelle erzeugen. Genauer wird vermutet, dass das Material im Spannbereich deutlich spröder ist als im aufgewärmten Bereich. Die Außentemperatur wirkt sich stärker als angenommen auf die Probe selbst aus, gemeint ist damit die Wärmeübertragung in der Probe selbst. Es scheint, dass der hohe Querschnitt im Spannbereich dies ausgleicht. Sobald sich der Querschnitt im Schenkelbereich jedoch reduziert, aber gleichzeitig das Material noch nicht die Prüftemperatur erreicht hat, bildet sich an dieser Stelle ein spröder(er) Bereich, an dem es zum Bruch kommt.

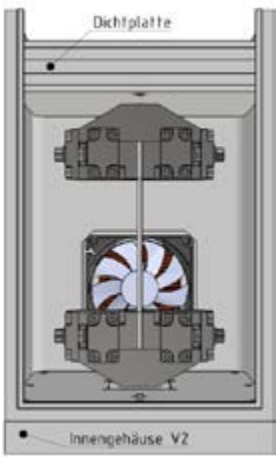


Abbildung 11 - Perspektivische Ansicht Innenkammer V2

5. ERGEBNISSE

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse der durchgeführten Zugproben durch ein Spannungs - Dehnungs - Diagramm graphisch dargestellt und beschrieben. In Tabelle 4 findet sich eine Übersicht mit allen durchgeführten Versuchen.

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt bei allen durchgeführten Untersuchungen 1 mm/s. Wenn nicht anders angegeben, beträgt das Prüfklima Raumtemperatur zwischen 21 °C und 23 °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 35 % bis 50 %. Es werden 6 Proben pro Versuchsart als Satz definiert, somit dient eine Probe als Sicherheit, um die Mindestanzahl von 5 Proben nach ISO 527 einzuhalten.

Tabelle 4 - Übersicht durchgeführter Zugversuche

Nr.	Versuchstyp
1	Gegenüberstellung: gekerbte Probe, gültiger & ungültiger Versuch, PLA Prusa
2	Zugprüfung Recyceltes Filament, PLA Prusa
3	Gegenüberstellung: Normprobe & modifizierte Probe, PLA Prusa
4	Gegenüberstellung Konditionierung: 24 Stunden, 4 Stunden & Raumtemperatur, PETG Extrudr
5	-20 Grad Celsius, PETG Extrudr
6	-10 Grad Celsius, PETG Extrudr
7	0 Grad Celsius, PETG Extrudr
8	10 Grad Celsius, PETG Extrudr
9	Raumtemperatur 20,8 Grad Celsius, PETG Extrudr
10	30 Grad Celsius, PETG Extrudr
11	50 Grad Celsius, PETG Extrudr
12	60 Grad Celsius, PETG Extrudr

Alle verwendeten Probenkörper, unabhängig von Material, werden durch FDM - 3D Druck erzeugt. Als Drucker kommt ein Prusa XL zum Einsatz. Die Einstellungen im Prusa Slicer entsprechen der Beschreibung aus dem entsprechenden Datenblatt (PLA, PETG) von Prusa.

Das recycelte PLA ist eine Mischung aus verschiedenen Prusament Farben. Ob die farbgebenden Zusatzstoffe einen Einfluss auf das Recycling beziehungsweise auf das recycelte PLA haben, kann nicht bestimmt werden. Versuche dazu wären interessant, können jedoch in dieser Arbeit keinen Einzug finden, da die Recyclinganlage während dieser Arbeit nicht dauerhaft einsatzbereit ist.
Die Proben sind nicht direkt aus zerkleinerten PLA gespritzt, sondern durch Erzeugung eines 1,75 mm Filaments gedruckt.

Wie in Abbildung 12 zu sehen, ist teils eine deutliche Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zu erkennen, wobei die Dehnung in etwas gleich bis geringfügig verbessert scheint. Die Zugfestigkeit ist deutlich verschlechtert. Auch der E - Modul, der in dieser Arbeit nicht normgerecht ermittelt werden kann, dürfte erheblich verschlechtert sein, da eine deutlich flachere Kurve im Spannungs - Dehnungs - Diagramm zu erkennen ist.

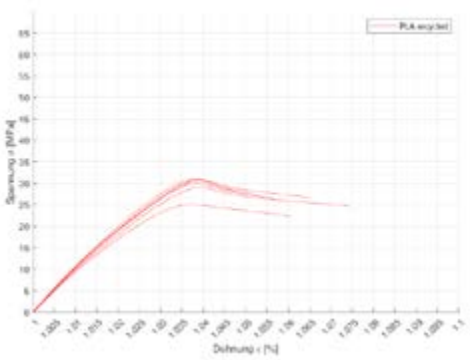


Abbildung 12 - Zugversuch von recycelten PLA

Die Untersuchung der Spannung / Dehnung in Abhängigkeit der Temperatur durch Stufen lässt sich durch eine polynomiale Flächenanpassung 3. Ordnung verbessert in einem 3D - Plot darstellen, siehe Abbildung 13.

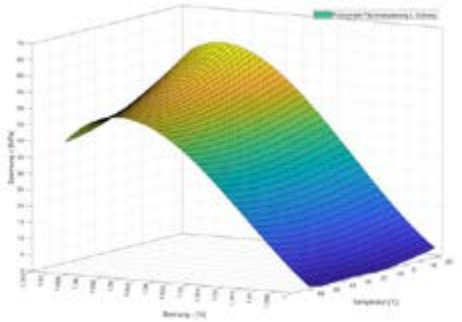


Abbildung 13 - Polynomiale Flächenanpassung über die Temperaturstufen der Spannungen und

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Als Fazit kann die ursprüngliche Aufgabe, eine Thermokammer für den bestehenden Prüfstand zu bauen, zum überwiegenden Teil als erfolgreich betrachtet werden. Verbesserungen sind möglich durch Anpassungen der Methodik. Ob eine Änderung des kompletten Prüfstands die sinnvollere Alternative darstellt, bietet einen Ansatz für eine weitere Arbeit.

7. LITERATURVERZEICHNIS

[1] A. Beck, Kunststoffe im Chemieunterricht, Graz: Karl-Franzens-Universität Graz, 2014.

[2] K. P. C. Vollhardt and N. E. Schore, Organische Chemie, 6 ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

[3] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer and T. Hirth, Kunststoffe : Eigenschaften und Anwendungen, 7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage ed., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

[4] Deutsches Institut für Normung, *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2019,* Berlin: Beuth Verlag, 2019.

[5] Deutsches Institut für Normung, *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012,* Berlin: Beuth Verlag, 2012.

AUTOR



Timo Tangel, BSc.

Fachhochschule Wiener Neustadt, Johannes-Gutenberg-Straße 3, 2700 Wiener Neustadt, timo.tangel@fhwn.ac.at

Lebenslauf:
Techniker Schollenberger Kampfmittelbergung GmbH 10.2010 - 09.2016, Fachschule Innenraumgestaltung HTBLVA Mödling 2006 - 2010, Berufsreifeprüfung Fachbereich Informationsmanagement und -Technologie WIFI Mödling 2016 - 2017, BSc. Mechatronik / Mikrosystemtechnik Fachhochschule Wiener Neustadt 2018 - 2021, MSc. Mechatronik - Additive Manufacturing Fachhochschule Wiener Neustadt seit 2021

QUANTIFIZIERUNG UND OPTIMIERUNG DES MECHANISCHEN VORSCHUBS FÜR EIN INDUSTRIELLES STEREOLITHOGRAPHISCHES 3D DRUCK SYSTEM

Nina Valvoda, BSc.

Kurzfassung: *Zur Quantifizierung des mechanischen Verschubs wird ein Prüfstand erstellt, dessen mechanische Komponenten, denen eines industriellen Systems der Additiven Fertigung gleicht. Dies erlaubt, verschiedene Anordnungen der mechatronischen und versteifenden Komponenten zu testen. Die Auswertung der Bewegung erfolgt über am Printhead befestigte Inkremental Encoder. Mit einer FEM- Analyse wurde der Aufbau statisch untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass der Aufbau sehr wiederholgenau ist und die Motorposition keinen wesentlichen Einfluss auf die Messungen hat. Die Durchbiegung des Teststandes kann mit einer Vielzahl an Verstrebungen verbessert werden. Der größte Einfluss auf die inhomogene Bewegung lässt sich auf die mechanische Montage und Ausrichtung der Führungsschienen zurückführen. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen eine Anschlagkante zur Ausrichtung der Schienen zu verbauen.*

Schlüsselwörter: *3D-Druck, FEM- Analyse, Inkrementalencoder, mechanische Versteifungen.*

1. EINLEITUNG

Mit der additiven Fertigung können Bauteile hergestellt werden, deren Geometrien zu komplex sind, um mit herkömmlichen Methoden wie Fräsen, Drehen oder Spritzguss gefertigt werden zu können. Die Komplexität der Bauteile hat in Bezug auf die Fertigungszeit und somit auch auf die Kosten einen geringen Einfluss, wenn man diese mit herkömmlicher Fertigung vergleicht [R. Lachmayr, 2018]. Zusätzlich entstehen bei einer kleinen Losgröße keine zusätzlichen Kosten, was der Anwendung in medizinischen Bereichen zugutekommt. So können individuelle Prothesen, Zahnimplantate oder Zahnspangen hergestellt werden. Die Bauteilkomplexität hat mit der konventionellen Fertigung ein geringeres Limit als mit additiver Fertigung, so können bionische, leichtgebaute, oder materialsparende Strukturen erzeugt werden. Abbildung 1 zeigt den Vergleich zwischen additiver und konventioneller Fertigung bezogen auf Kosten, Losgröße und Bauteilkomplexität.

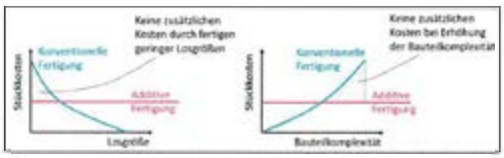


Abb. 1: Qualitative Zusammenhänge zwischen konventioneller Fertigung und additiver Fertigung in Bezug auf Stückkosten, Losgröße und Bauteilkomplexität [R. Lachmayr, 2018]

Konventionelle Stereolithografie (SLA) Systeme sind mit statischen Belichtungssystemen ausgestattet, bei denen eine zweidimensionale Ebene belichtet wird. Für industriell relevante Produktionszeiten haben sich dynamische Belichtungssysteme etabliert. Hier wird die Lichtquelle in einer mobilen Einheit (Moving Unit) über die Bauplattform bewegt. Synchron mit der mechanischen Bewegung wird die Belichtungssequenz ähnlich einem Film abgearbeitet. Diese Kopplung aus mechanischem und optischem Verfahrweg ist essenziell für maßhaltige Fertigung über eine Baufeldlänge von bis zu einem Meter.

2. PROBLEM- UND AUFGABENSTELLUNG

Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines Teststandes zur mechanischen Vermessung des Vorschubverhaltens in einem 3D-Druck Prozess. Dieser Teststand besteht aus einer Rahmenkonstruktion (Frame), sowie einer beweglichen Einheit (Moving Unit). Am Teststand wird in einem ersten Schritt die Gleichförmigkeit der mechanischen Bewegung quantifiziert. In einem zweiten Schritt werden mechanische Einflüsse auf die Uniformität der Bewegung untersucht. Konstruktive (z.B.: Versteifung), sowie regelungstechnische (z.B. aktive Regelung) Einflüsse werden untersucht. Das Ziel der Arbeit ist ein Lastenheft der nötigen Anforderungen sowie die Abschätzung der Limitationen eines dynamischen 3D-Druck Systems.
Die Firma Cubicure sieht in dieser Arbeit das Potential, die Fertigungsgenauigkeit ihrer Anlagen einerseits zu quantifizieren und andererseits zu optimieren. Durch die Verbesserung wird ein Sprung in der Fertigungsqualität erwartet, der es ermöglicht, mit hochpräzisen Lichtquellen in industriellem Maßstab zu fertigen. Das bedeutet, Wandstärken von 0,3 mm und Lochdurchmesser von 0,4 mm mit Toleranzen von nur +- 0,05 mm zu drucken.

3. MATERIALIEN UND METHODEN

Um verschiedene Ausganssituationen der Maschine testen zu können, wird der Teststand in verschiedenen Konfigurationen aufgebaut. Diese umfassen unterschiedliche Motorpositionen (Abb. 2 links) und unterschiedliche mechanische Verstrebungen (Abb. 2 rechts).

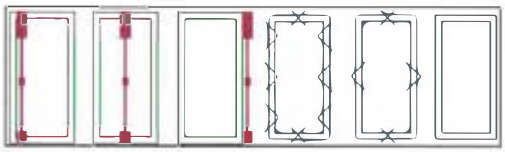


Abb. 2: Motorpositionen und Verstrebungen

Die Bauteile wurden so gewählt, dass mit dem Verhalten des Prüfstandes auf das Verhalten der Cubicure Maschinen geschlossen werden kann.

Es wird angenommen, dass sich die Moving Unit aufgrund des einseitigen Antriebs schräg stellt. Um das zu beweisen und zu quantifizieren, werden an der linken und rechten Seite der Moving Unit Linearencoder montiert. Diese geben die genaue Position an, an der sich die Moving Unit auf jeder Seite befindet. Die Differenz der Encoder gibt an, wie schräg die Moving Unit steht. Dieser Wert wird zur Optimierung herangezogen.

In Abb. 3 ist die Regelstrecke des Teststandes zu sehen, die den Zusammenhang zwischen Motor, Encoder und Auswertung abbildet. Der Motor wird mithilfe von Beckhoff Komponenten angesteuert. Er hat einen integrierten Encoder, welcher in die Regelung zurückgeführt wird.

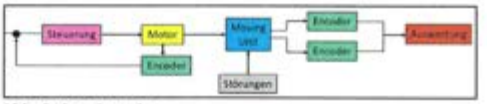


Abb. 3: Regelstrecke

Die Konstruktion des Teststandes erfolgt mit dem Programm Inventor, die Regelung und Ansteuerung mit TwinCAT und die Erstellung des Schaltplans mit QelectroTech.

4. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Die Konstruktion (Abb. 4) besteht aus zwei Hauptmodulen, dem Frame und der Moving Unit.
Der Frame ist das Grundgerüst und aus ITEM- Profilen zusammengesetzt. Dieser wird mit Alustreben verstärkt. So soll die Durchbiegung verringert werden. Der Printhead besteht aus einer Grundplatte (lila) mit einem ITEM-Aufbau. An der Grundplatte sind über eine Halterung (hellgrün) zwei Encoder angeschraubt. Die Schienen mit Führungswagen und der Mitnehmer bilden die Verbindung der beiden Baugruppen. Je eine Motor- sowie zwei Encoder- Baugruppen werden am Frame montiert.

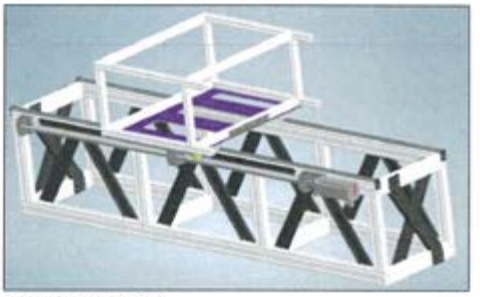


Abb. 4: Konstruktion

Der Frame wird mit einer FEM- Simulation untersucht. Das Ziel der Statikanalysen ist herauszufinden, ob und wie viele Verstrebungen nötig sind, um eine geringere Durchbiegung zu erhalten. Das ist aus prozesstechnischen Gründen notwendig. Zurzeit druckt Cubicure standardmäßig eine Schichtdicke von 0,05 mm, wobei 0,025 mm auch möglich ist. Dazu wird der Prüfstand einigen Simulationen unterzogen.



Abb. 5: FEM- Simulationen

Zur Quantifizierung (Abb. 5, links) des aktuellen Systems wird die Durchbiegung der Maschine simuliert. Das Gewicht der Moving Unit wird mit 1500 N berücksichtigt. Es wird eine maximale Durchbiegung von 0,1121 mm erreicht.
In der Optimierung (Abb. 5, rechts) ist der gesamte Frame mit allen Verstrebungen zu sehen. Das ist die steifste Version. Sie hat eine Durchbiegung von 0,04259 mm, wenn das Gewicht in der Mitte wirkt. Bei dieser Version sind so viele Verstrebungen wie platztechnisch möglich eingebaut.



Abb. 6: Teststand

Ein Foto vom Teststand ist in Abb. 6 zu sehen. Dieser steht auf einem Montagewagen, da dieser zum Boden ausgerichtet werden kann. Nach der Inbetriebnahme wurden die Tests durchgeführt und ausgewertet.
Die Experimente werden in allen mechanischen Konfigurationen durchgeführt. Folgend eine Tabelle zur Übersicht (Tab. 1). Hier zu beachten ist, dass viele Messungen mehr als einmal durchgeführt werden. Der von Cubicure vorgegebene Geschwindigkeitsbereich liegt bei 10, 20, 30 und 50 mm/s. Zusätzlich werden die Geschwindigkeiten 100 mm/s und 300 mm/s zur Grenzermittlung getestet.

Motorposition	Strebenanzahl	Geschwindigkeiten [mm/s]
Links	16	10, 20, 30, 50, 100, 300
Links	8	10, 20, 30, 50, 100, 300
Links	0	10, 20, 30, 50, 100, 300
Mitte	16	10, 20, 30, 50, 100, 300
Mitte	8	10, 20, 30, 50, 100, 300
Mitte	0	10, 20, 30, 50, 100, 300
Rechts	16	100
Rechts + Schienen verstellt	16	50, 100

Tab. 1: Durchgeführte Tests

5. ERGEBNISSE

Bei der Messung wird die Position, die Geschwindigkeit und das Drehmoment ausgegeben. Aus den Encoderpositionen wird die Differenz ermittelt und dargestellt.

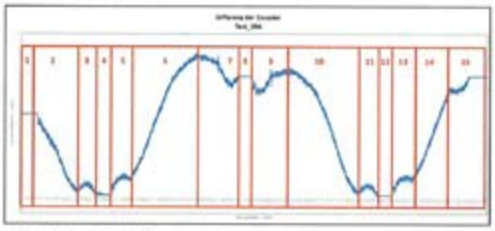


Abb. 7: Encoderdifferenz

Die Encoderdifferenz (Abb. 7, 300 mm/s) kann in Segmente untereilt und wie folgt interpretiert werden.
1) Stillstand in der Mitte des Prüfstandes und Aufzeichnungsstart
2) Fahrt zum vorderen Teststandende, dabei stellt sich der Printhead leicht schräg, da die Differenz der Encoder größer wird.
3) Bremsvorgang, die Encoderdifferenz reduziert sich leicht
4) Stillstand
5) Starke Beschleunigung in die Gegenrichtung
6) Fahrt zum hinteren Ende des Teststandes
7) Bremsvorgang, die Encoderdifferenz reduziert sich wieder leicht
8) Stillstand
9) Starke Beschleunigung in die erste Fahrtrichtung
10) bis 14) wiederholt 2) bis 6)
15) Stehen bleiben, Ende der Aufzeichnung
Die maximale Differenz der Encoder liegt bei 0,8mm.

Mit weniger Geschwindigkeit wird die Kurve flacher (geringere max. Differenz), da Beschleunigen und Bremsen nicht so ruckartig ausgeführt wird. Dieses Verhalten ist im Laufe der Tests zu beobachten. Die maximale Encoderdifferenz ändert sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und bei gleichbleibender Motorposition sowie Strebenanzahl nur gering.
Was das Verhalten des Prüfstandes mit verschieden Motorpositionen angeht, ist die Interpretation komplexer da sich die Kurve nicht ändert.
Dieses Phänomen spricht gegen die Erwartung, bei der das auftretende Moment um die Z-Achse ausgeglichen werden sollte und die Encoderdifferenz geringer sein sollte. Um jedoch zu prüfen, ob die Encoderwerte richtig interpretiert werden, wird der Motor auch auf die rechte Seite des Teststandes montiert. Die Encoderdifferenzkurve sollte sich um die Zeitachse spiegeln (Abb. 8, oben) da das Moment um die Z-Achse der Moving Unit invertiert wird (Abb. 8, unten).

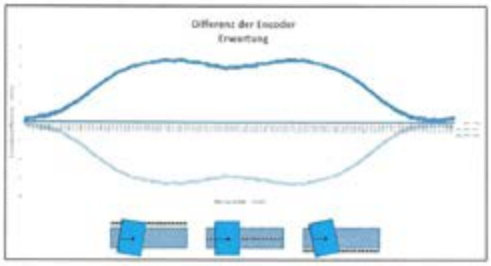


Abb 8: Erwartung der Encoderdifferenz

Da die Tests, mit dem Motor auf der rechten Seite, dieselbe Differenzkurve aufweisen, wie die Tests mit den anderen Motorpositionen, wird klar, dass die gemessene Differenz einen anderen Ursprung haben muss, oder die Interpretation der Encoderwerte fehlerhalt ist. Um zu klären, woher die Werte kommen, wird der „Laserversuch" (Abb. 9, links) gemacht.

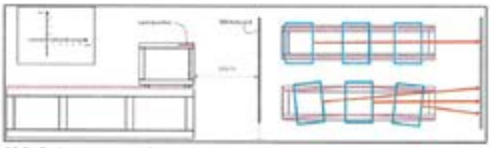


Abb 9: Laserversuch

Dieser beruht auf der These, dass die Schienen nicht ausreichend ausgerichtet sind. Das hat zur Folge, dass der Printhead Kurven fährt und so die Encoderdifferenz entsteht.
Für den Laserversuch wird ein Laserpointer der Klasse 2 an der Moving Unit montiert. Der Laserpunkt wird auf einer gegenüberliegenden Wand markiert und beobachtet, wie sich seine Position ändert. Das Ergebnis sind drei Zentimeter, bei einem Abstand von 160cm zwischen Wand und Prüfstand. Der Laserpunkt bewegt sich nur horizontal und gleichmäßig (er schwingt nicht). Daraus ist ersichtlich, dass sich der Printhead nur in eine Richtung um einen Winkel von 0,019° „verwindet". Eine schematische Darstellung der SOLL- und IST- Verwindung zeigt die Draufsicht in Abb. 9, rechts.

Die Interpretation von Abb. 7 ist nun folgende:
1) Stillstand in der Mitte des Prüfstandes und Aufzeichnungsstart
2) Fahrt zum vorderen Teststandende, dabei fährt der Printhead die erste Kurve.
3) Bremsvorgang, die Encoderdifferenz reduziert sich leicht, da die Verdrehung um Z am Ende geringer ist als in der Mitte des Teststandes.
4) Stillstand
5) Beschleunigung in die Gegenrichtung
6) Fahrt zum hinteren Ende des Teststandes (wieder eine Kurve, da die Encoderdifferenz steigt, je weiter der Printhead fährt)
7) Bremsvorgang, die Encoderdifferenz reduziert sich wieder leicht
8) Stillstand
9) Beschleunigung in die erste Fahrtrichtung
10) bis 14) wiederholt 2) bis 6)
15) Stehen bleiben, Ende der Aufzeichnung

Da die Moving Unit eine Kurve fährt werden die Schienen neu ausgerichtet und es entsteht eine komplett neue Kurvengeometrie. Die Encoderdifferenz dessen ist in Abb. 10 zu sehen und weist ein sehr wiederholgenaues, reproduzierbares Ergebnis auf. Es ist zu erkennen, dass die Ausrichtung der Schienen eine wichtige Rolle spielt, wenn große Bauteile über das gesamte Baufeld gedruckt werden sollen. Bei kleineren Geometrien fällt dieser Fehler noch nicht auf. Das führt zu Fehlern im Hinblick auf die Anwendung.

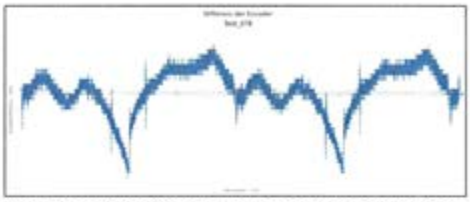


Abb. 10: Encoderdifferenz mit neu ausgerichteten Schienen

Um die Gleichmäßigkeit des Vorschubes zu beurteilen, wurden die Encoderwerte einzeln ausgewertet. Die Moving Unit wurde mit konstanter Geschwindigkeit verfahren. In Abbildung 11 ist ein Ausschnitt des linken Encoders zu sehen. Aus der Grafik ist ein linearer Anstieg der Werte ersichtlich. Da es keine Ausreißer oder nichtlineare Messpunkte gibt, ist zu erkennen, dass der Vorschub korrekt eingestellt ist.

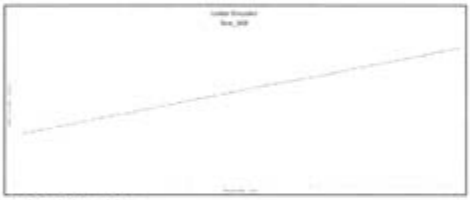


Abb. 11: Vorschub

Ab und zu sind kleine Unregelmäßigkeiten in den Encoderwerten zu erkennen. Diese haben jedoch immer den Wert: 12,5 µm. Das bedeutet, dass hier die Auflösungsgrenze des Encoders erreicht wird. Um diese geringen Unregelmäßigkeiten noch weiter zu untersuchen würde ein genauerer Encoder gebraucht werden. Das ist für dies Anwendung jedoch noch nicht mehr notwendig.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die FEM- Analyse hat ergeben, dass mit den Verstrebungen eine deutliche Besserung erzielt werden kann, da die Quantifizierung eine maximale Durchbiegung von 0,1121 mm hat und der optimierte Teststand eine maximale Durchbiegung von nur 0,04259 mm aufweist. Durch die Auswertung der Encoder ist ersichtlich, dass die maximale Encoderdifferenz 0,8 mm beträgt und linear steigt. Diese Linearität hat in Zusammenhang mit verschiedenen Motorpositionen, aber gleichbleibenden Ergebnissen dazu geführt, dass die Geradheit der Schienen infrage gestellt wurde. Über den Laserversuch wurde bewiesen, dass die Moving Unit auf den Schienen einen Bogen fährt. Die Ungleichheit des Vorschubs des Motors liegt unter der Auflösungsgrenze der Encoder, welche 12,5 µm beträgt.
Das Ergebnis der Arbeit ist eine Reihe von Erkenntnissen und Verbesserungsvorschlägen für diese Art von Drucktechnologie. Zum einen müssen technische Maßnahmen getroffen werden, um die Schienen genauer auszurichten.
Zum anderen muss der Frame versteift werden, dann ist die Durchbiegung geringer und es kann eine kleinere Schichtdicke über die gesamte Bauplattform erzeugt werden.
Statt dem synchronen Servomotor, der jetzt verbaut ist, könnte auch ein Linearmotor verbaut werden, um den Gleichlauf noch weiter zu verbessern.

7. LITERATURVERZEICHNIS

Roland Lachmyer, Rene Bastion Lippert, Stefan Kaierle Hrsg. *Additive Serienfertigung*. Deutschland: Springer Vieweg, 2018.

NINA VALVODA



Nina Valvoda BSc.

Cubicure GmbH, Gutheil-Schoder-Gasse 17, 1230 Wien, +43 010581043912, nina.valvoda@cubicure.com

HTL-Matura 2017, Bachelor-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik" an der FH Wiener Neustadt 2017 bis 2021, Master-Studium „Mechatronik" an der FH Wiener Neustadt seit 2021, Project Engineer bei Cubicure seit 2022

Freigabe zur Veröffentlichung:

Cubicure GmbH
Dr. Robert Gmeiner (CEO)
Gutheil-Schoder-Gasse 17
Tech Park Vienna (TPV)
1230 Wien
Tel.: +43 1 5810439 10

Dr. Robert Gmeiner

ERFORSCHUNG UND ENTWICKLUNG EINER ADDITIV GEFERTIGTEN POLYMEREN OPTISCHEN LINSE

Josip Vidović, BSc.

Kurzfassung: *Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin zu klären, ob für mögliche Prototypentests und erste Erkenntnisse bei optischen Systemen additive gefertigte Linsen verwendet werden können. Dafür müssen klimatische Tests als auch optische Untersuchungen durchgeführt werden. Hier wird gezeigt, dass durch das Lösungsmittel Isopropanol, welches für das Auswaschen des Restresins verwendet wird, die durchsichtige Eigenschaft der Linsen beeinträchtigt wird. Es werden unterschiedliche Maßnahmen untersucht, wie man diese Eigenschaft wieder zurückerlangt. Dabei werden die Linsen wieder in das Harz getaucht, was zwar in Hinsicht der Klarheit funktioniert, doch das Restmaterial eine anhaftende Oberfläche zurücklässt. Eine andere Möglichkeit ist das Polieren der Linsen, was sich zunächst auf das händische Polieren beschränkt. Das Ergebnis, sind klare Linsen, die aber durch Ungleichmäßigkeiten beim händischen Polieren Kratzer aufweisen. Für die thermischen Tests werden verschiedene Temperatur- und Feuchtigkeitstests durchgeführt, um Eigenschaftsänderungen zu erkennen. Diese Tests zeigen, dass sich die Linsen nach dem Temperatureinfluss verfärben. Diese Verfärbung unterscheidet sich je nach verwendetem Lösungsmittel, was durch eine Wellenlängenmessung der Transmission gezeigt wird.*

Schlüsselwörter: *Optische Linsen, 3D-Druck, Polierung, thermische Tests*

1. EINLEITUNG

Optik ist ein wichtiger Wissenschaftszweig, der die Erzeugung, Ausbreitung und Messung elektromagnetischer Strahlung in einem breiten Wellenlängenbereich, von Terahertz- und Infrarotwellen über sichtbares Licht bis hin zu Ultraviolettstrahlen sowie die Wechselwirkung dieser Strahlung mit Materie untersucht. Instrumente, die Licht erzeugen, manipulieren und detektieren, sind als optische Elemente bekannt (Z. Yizhen, 2022).

3D-gedruckte optische Linsen mit Durchmessern von mehr als 1 mm bis weniger als 1 µm sowie das direkte Drucken von mehrskaligen Objektiven haben ein ungeahntes Potenzial im Bereich der Optik (Z. Yizhen, 2022). Die Herstellung hochwertiger optischer Komponenten erfordert jedoch Sub-Nanometer-Auflösung mit guter Oberflächenkontrolle, um die gewünschten optischen Eigenschaften zu gewährleisten. Etablierte Herstellungsverfahren wie der Präzisionsspritzguss und die Mikropräzisionsbearbeitung sind zeit- und kostenaufwändige Prozesse, um diese Anforderungen zu erfüllen. 3D-Drucktechnologien haben sich in letzter Zeit über das (Rapid) Prototyping hinaus entwickelt und sind zu einem attraktiven Werkzeug für die Herstellung von leichten, komplexen und kostengünstigen optischen Komponenten in Industriequalität geworden (Z. Yizhen, 2022).

Die Aufgabe dieser empirischen Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung einer mittels eines CAD-Programms modellierten und durch das Stereolithografie (SLA)-Verfahren additiv gefertigten polymeren optischen Linse. Dabei soll nicht nur auf die Fertigung und Nachbearbeitung/Glättung eingegangen werden, sondern auch auf die Anforderungen und den Vergleich zu herkömmlich hergestellter Kunststofflinsen. Dafür sind die optische Dichte, die Transmission und die thermische Stabilität zu ermitteln. Durch die Untersuchung soll herausgefunden werden, ob es überhaupt sinnvoll ist, eine derartige Linse herzustellen und wie sich deren Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Kunststofflinsen verändet. Dabei werden erste Schritte gesetzt, indem Werkstoffe von der Firma Formlabs verwendet werden, um deren unterschiedliche Platzierungen im 3D-Drucker festzustellen. Durch wiederholtes Modellieren, Drucken und Untersuchen sollen Erkenntnisse aufgebaut werden, wo eine additiv gefertigte Linse im Unternehmen eingesetzt werden könnte. Dabei ist es auch entscheidend, unterschiedlich große und dicke Linsen zu untersuchen, um in diesem Gebiet einen fundierten Wissensstand zu generieren.

Mögliche Probleme bei dieser Arbeit könnten sein, dass die Dimensionierung der Linsen zwischen Design und Druck nicht übereinstimmt da sich die Linse verzogen hat. Auch sind die einzelnen Schichten der gedruckten Linse ein Hindernis für die Durchlässigkeit der Linse. Die Polierung und der Nachbearbeitungsprozess kann auch bei ungenauem Abtragen der Oberfläche zu Kratzern führen was vermieden werden soll.

Ziel ist es, den Leser*innen dieser Arbeit zu vermitteln, dass der 3D-Druck schon lange nicht mehr nur für den Heimgebrauch in Verwendung ist, sondern auch die Industrie erreicht hat. Das derzeitige Problem bei herkömmlichen Linsen in Unternehmen ist die Abhängigkeit von Zulieferern und die Zeitspanne zwischen Bestellung und Lieferung. Dadurch ist die Flexibilität des Unternehmens eingeschränkt, und es ist nicht möglich, speziell auf deren Wünsche angepasste Linsen zu fertigen. Der 3D-Druck ermöglicht es, Linsen nach Bedarf rasch zu ändern. Durch interne Fertigung kann die Produktpalette erweitert und in beliebiger Stückzahl produziert werden.

2. MATERIALIEN UND TESTS

Die Grundlage des 3D-Druckens mit Resin ist die Photopolymerisation, ein Prozess, bei dem flüssige Monomere und Oligomere durch die Einwirkung von Licht in feste Polymere umgewandelt werden. Dies geschieht in mehreren Schritten. In der Stereolithografie erfolgt die Aushärtung des Harzes schichtweise durch die gezielte Bestrahlung mit einem UV-Laser. Die Harzlösung, besteht aus Monomeren, Oligomeren, Photoinitiatoren und Additiven. Der Laser zeichnet die Querschnittsform des Objekts auf die Oberfläche des Harzes, wodurch eine dünne Schicht ausgehärtet wird. Nachdem eine Schicht fertig ist, wird die Bauplattform abgesenkt, um Platz für die nächste Schicht zu schaffen. Dieser Prozess wiederholt sich, bis das gesamte Objekt gedruckt ist (I. Gibson, 2015).

Für die Herstellung von Linsen werden Materialien benötigt, die transparent sind und eine definierte Brechzahl aufweisen, um Licht effektiv zu brechen und zu fokussieren(R. Kingslake, 1978).

In Abb. 1 ist die Materialeigenschaft des Clear Resins zu finden.

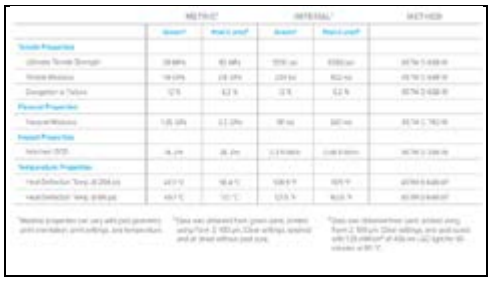


Abb. 1: Materialeigenschaften vom Clear Resin (M. Lobovsky, 2017)

Das Polieren von Linsen ist ein entscheidender Schritt in der Fertigung, um die optische Qualität und Leistung zu verbessern. Es dient dazu, Oberflächenfehler zu minimieren, die Oberfläche zu glätten und die optischen Eigenschaften wie Transmission und Reflexion zu optimieren. Der Prozess beginnt mit dem groben Polieren, um gröbere Oberflächenfehler wie Rillen und Unebenheiten zu entfernen. Dies geschieht durch die Verwendung von abrasiven Materialien, die in einer Schleifpaste oder -lösung eingebettet sind (K. Schwertz, 2008).

Die Linse wird gegen das Polierwerkzeug gedrückt, während es sich mit einer definierten Geschwindigkeit dreht. Der Druck und die Drehgeschwindigkeit werden kontrolliert, um eine gleichmäßige Abtragung der Oberfläche zu gewährleisten. Nach dem groben Polieren folgt das Feinschleifen, um die Oberfläche weiter zu glätten und kleinere Fehler zu entfernen. Feinere Poliermittel werden verwendet, um die Oberfläche allmählich zu verfeinern und die optischen Qualitäten zu verbessern.

2.1 Testmöglichkeiten

Vor dem Verwenden des Klimaschrankes sind geforderte Parameter für die Alterung bei hohen/niedrigen Temperaturen (siehe Abb.2) zu überprüfen und die Qualität der Linse bei Raumtemperatur als auch der maximalen und minimalen Temperatur (Tmax = +105°C, TRT und Tmin = -40°C) zu kontrollieren (IEC 60068-2-30, 2005). Die Bauteile sind durch Sichtprüfung nach DIN EN 13018 (DIN EN 13018, 2016) auf äußere Beschädigungen/Veränderungen wie Risse, Abplatzungen/Abblätterungen, Verfärbungen, Verformungen etc. zu überprüfen. Änderungen der Werte der Schlüsselparameter, des Funktionsverhaltens sowie Unregelmäßigkeiten, die während der Sichtprüfung festgestellt wurden, sind anhand des neuen Zustands im Hinblick auf die vorherigen Prüfexpositionen zu bewerten.

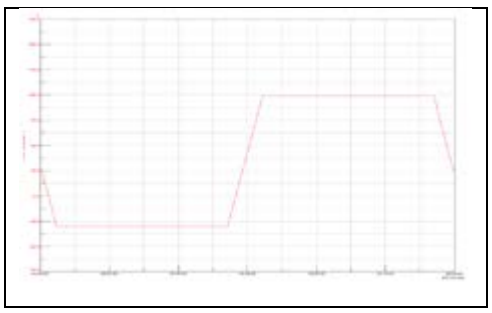


Abb. 2: Temperaturverlauf von der Lagerung bei hohen/tiefen Temperaturen

Der Dump Heat Cyclic Test simuliert die thermische Einwirkung auf ein Bauteil bei einer zyklische Temperaturänderungen bei hoher Luftfeuchtigkeit während des Fahrzeugbetriebs. Die Prüfung dient dazu, die Funktion des Bauteils bei feuchter Hitze zu überprüfen. Für weitere Tests soll auch der Einfluss der Luftfeuchtigkeit berücksichtigt werden. Dabei soll eine Luftfeuchtigkeit von 95% (IEC 60068-2-38, 2009) erreicht werden und die Temperatur auch eine Kältephase beinhalten, um auch Frost zu simulieren.

Nach allen Tests wird eine optische Begutachtung mittels Mikroskops vorgenommen, um die Auswirkungen auf die Linsen zu ermitteln. Auch ist es notwendig Tests im optischen Labor durchzuführen und diese mit den Umwelttests zu kombinieren.

3. PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Es ist relevant mehrere Erfahrungen über die Eigenschaften der jeweiligen Linsen zu sammeln. So wird mit der Zeit der Arbeit das Linsendesign geändert, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Dabei wird zwischen plan-kovex und bi-konkaven Linsen gewechselt, aber auch der Durchmesser verändert (siehe Abb. 3 & Abb. 4).

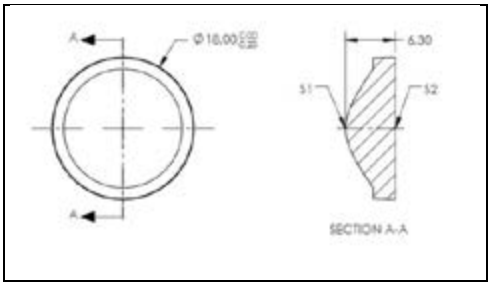


Abb. 3: Gepressten asphärische Kondensorlinse 18mm x 8,4mm BW, MgF2-Beschichtung

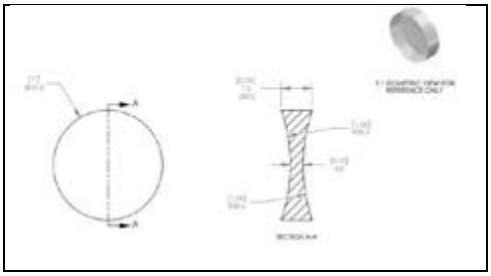


Abb. 4: LD2297 - N-SF11 Bi-Konkav, Ø25.4 mm, f = -25.0 mm (A. Cable, 2024)

Ein wesentlicher Teil bei der praktischen Durchführung umfasst die Nachbearbeitung. Diese ist notwendig, da die Linsen Restharz aufweisen welches entfernt werden muss. Dafür gibt es unterschiedliche Ansatzmöglichkeiten die in weiterer Folge durchgeführt und verglichen werden. So ist das Ziel eine annähernd durchsichtige Linse zu schaffen die mit herkömmlich hergestellten Linsen vergleichbar ist. Für diese Versuche wird die Linse erneut in Isopropanol getaucht bzw. eine weitere dünne Schicht des Resins leicht aufgetragen. Durch das zusätzliche Resin soll es die Mikroschichten der Linsen auffüllen, was die Trübheit entfernen soll. Eine weitere Methode ist das Schleifen und Polieren der Linse, um die Unebenheiten zu glätten und eine klare Oberfläche zu

gewinnen. Eine Vakuumplatte wäre in diesem Fall eine mögliche Herangehensweise, da die Linsen für das Polieren fixiert werden müssen und durch den Sog die Linsen an der entsprechenden Stelle der Platte angesaugt werden (siehe Abb. 5).

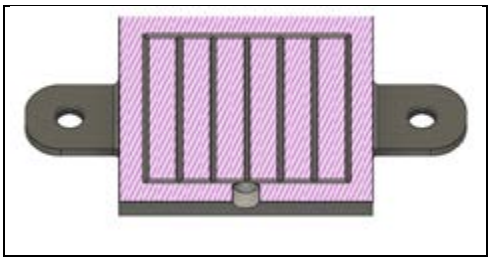


Abb. 5: Schnitt der Vakuumplatte

Um sich auch in Richtung Kosteneffizienz zu bewegen, wird die automatisch generierte Stützstruktur mit einer eigens entwickelten ersetzt. Diese soll dazu dienen, dass der Harzverbrauch reduziert wird, aber auch die Stützen individuell zu gestalten, was in Abb. 6 ersichtlich ist.



Abb. 6: Schnitt der Vakuumplatte

Das übliche Lösungsmittel, welches auch von verschiedenen 3D Druck Herstellern vorgeschlagen wird, ist Isopropanol, doch ist der Vergleich zu anderen Lösungsmitteln, die üblicherweise in der Mikrofertigung verwendet werden, auch von Interesse. Dies soll Erkenntnisse erbringen welches Lösungsmittel für den Anwendungsbereich von Linsen am besten funktioniert. Die optischen Untersuchungen als auch die Testmöglichkeiten werden mit den Linsen vorgenommen. Dafür ist notwendig zu wissen, welche Beanspruchungen die Linsen bestehen und wie sich das Material dadurch verändern. Für diese Erkenntnisse werden Temperatur- und Feuchtemessungen durchgeführt und die Resultate mit herkömmlich hergestellten Linsen verglichen.

4. ERGEBNISSE

Beim ersten Schleifprozess wird auf die manuelle Bearbeitung der Linsen und je nach Erfolg auf eine mögliche Lösung mittels CNC-Maschine gesetzt. Verwendet wird ein herkömmliches Poliermittel für Kunststoff und einem Dremel um so die Schichten der Linse abzutragen. Schwierig an diesem Vorgehen ist eine gleichmäßige Politur, da auch die Krafteinwirkung pro Fläche variieren kann. Im ersten optischen Test wird einmal eine gedruckte Linse, die nach dem Waschen und Durchhärten zusätzlich poliert wurde und zum anderen eine herkömmliche Linse, die bei Thorlabs erworben wurde mittels Laser getestet. Erkennbar in Abb. 7 ist die höhere Streuung der gedruckten Linse. Dies ist geschuldet durch die händische Nachbearbeitung, da eine gleichmäßige Abtragung der Oberfläche nur schwer möglich ist. Die einzelnen Schichten im µm Bereich der gedruckten Linsen, erweisen sich auch als Nachteil, da keine genaue Fokussierung des Lichts möglich ist und das einstrahlende Licht gebrochen wird.

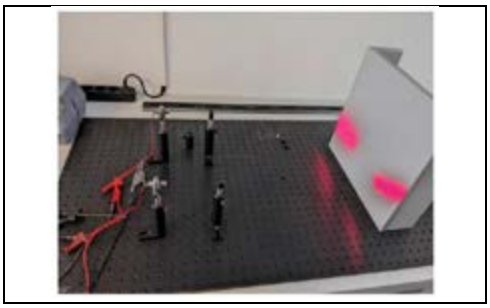


Abb. 7: Ersichtlicher Unterschied zwischen beiden Linsen bei dem Durchlässigkeitstest der Linse mithilfe eines Lasers

Isopropanol ist das herkömmlichste Lösungsmittel, die bei der Nachbearbeitung verwendet wird, doch gibt es auch alternativen, die für den Einsatz herangenommen werden können. So konnten zwei weitere Lösungsmittel in Betracht gezogen werden und die Ergebnisse aller drei miteinander verglichen werden. Dabei handelt es sich um das Edge Bead Removal (EBR) Lösungsmittel und NMP N55 (N-Methyl-2-pyrrolidon).

Bei der Untersuchung mit Temperatureinfluss, haben sich die Linsen nach dem Dauertemperatureinfluss von 105°C verfärbt. Es ist zu erkennen, dass Isopropanol deutlich stärkere Spuren der Verfärbung aufweist (siehe Abb. 8) als die beiden anderen Lösungsmittel. Zu beachten ist, dass außer der visuellen Verfärbung keine Risse oder weitere Beschädigungen als Folge des Klimatests erkennbar sind.



Abb. 8: Linsen nach dem Dauertemperatureinfluss von 105°C (links EBR, Mitte Iso, rechts N55)

4.1 Wellenlängenmessung

Nach den Erkenntnissen des Temperatureinflusses werden die Linsen optisch untersucht. Für eine Vergleichsmessung der 3D-gedruckten Linsen wird auch die Thorlabs Linse herangezogen, um einen klaren Unterschied bei der Wellenlängenmessung zu erkennen. Außerdem werden die 3D-gedruckten Linsen untereinander verglichen, um auch Unterschiede zwischen den einzelnen Lösungsmitteln nach dem Temperatureinfluss darzustellen.

Für die optische Untersuchung (siehe Abb. 9) werden die Linsen in die Thorlabs Halterung LMR1 eingespannt und Licht durch die Linse gestrahlt. Auf der anderen Seite ist der Sensor befestigt, welcher die Wellenlängen aufnimmt und über eine Verbindung mit dem Computer das Spektrum anzeigt.

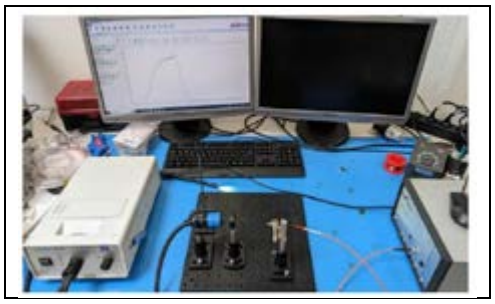


Abb. 9: Setup der Wellenlängenmessungen

Das Ergebnis in Abb. 10 zeigt deutlich, dass sich die 3D-gedruckten Linsen unter Temperatureinfluss von der Thorlabs Glas Linse unterscheidet. Das gesamte für den Menschen sichtbare Spektrum ist reduziert. Am stärksten ist dies im grünen und roten Spektralbereich ersichtlich. Durch diese Verfärbungen wird das Licht im entsprechenden Spektralbereich absorbiert und gelangt daher nicht mehr zum Sensor, der diese Werte ausliest.

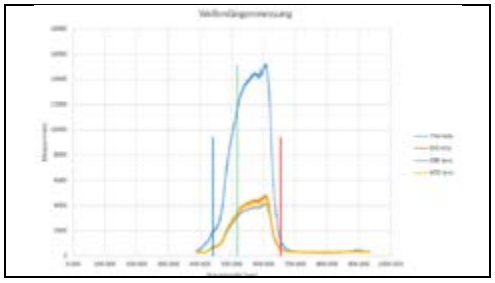


Abb. 10: Messung Vergleich Thorlabs linse und 3D-gedruckten Linsen (x-Achse Wellenlänge; y-Achse Count)

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Herstellung und Evaluierung von 3D-gedruckten Linsen, insbesondere unter Berücksichtigung von Temperatur- und optischen Faktoren. Es wurde festgestellt, dass die Linsen unter Temperatureinfluss zu Verfärbungen neigen, was die Genauigkeit der transmittierten Wellenlänge beeinträchtigt. Die Verwendung eines alternativen Lösungsmittels kann die Verfärbung zwar reduzieren, behebt das Problem jedoch nicht vollständig. Ein weiteres signifikantes Problem stellt das Polieren der Linsen dar. Manuelle Poliermethoden führen zu uneinheitlichen Ergebnissen, was die optische Qualität der Linsen beeinträchtigt. Eine mögliche Verbesserung wäre die Automatisierung des Polierprozesses. Positiv hervorzuheben ist das im CAD-Programm entwickelte Design der Stützstrukturen. Dieses Design kann in anderen Projekten verwendet werden, um den Materialverbrauch zu minimieren und die Druckzeit zu verkürzen. Zudem erlaubt es eine individuellere Anpassung der Linsenstrukturen. Trotz der erwähnten Herausforderungen und Einschränkungen bieten die 3D-gedruckten Linsen dennoch potenzielle Anwendungsmöglichkeiten. Insbesondere für Prototypen und erste Erkenntnisse sind sie geeignet. Die Limitierungen durch Verfärbung und Trübheit schränken jedoch die Einsatzmöglichkeiten ein. Die Implementierung weiterer Verbesserungen, wie der Einsatz spezialisierter Nachbearbeitungsgeräte und die Verwendung besser geeigneter Materialien, könnte die Anwendungsbreite der 3D gedruckten Linsen erheblich erweitern. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass das Design und die Herstellung von 3D-gedruckten Linsen eine vielversprechende Lösung für bestimmte Anwendungen darstellen, jedoch durch die Verfärbung und dem Polierprozess Einschränkungen vorweisen, weshalb erhebliches Optimierungspotenzial besteht. Zukünftige Arbeit sollten sich auf die Verbesserung der Nachbearbeitungstechniken und die Auswahl geeigneterer Materialien konzentrieren, um die Einsatzmöglichkeiten weiter zu steigern.

6. LITERATURVERZEICHNIS

Z. Yizhen, T. Tengteng, Z. Suyi, et al. (2022). *Recent advancements and applications in 3D printing of functional optics*. Additive Manufacturing Volume 52

I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Springer (S.1-42)

R. Hongwen und W. Shin-Tson. (2012). *Introduction to Adaptive Lenses*. John Wiley & Sons, INC (S.1-21)

R. Kingslake. (1978). *Lens Design Fundamentals*. Academic Press (S.1-19)

K. Schwertz. (2008). *An Introduction to the Optics Manufacturing Process*. OptoMechanics (OPTI 521).

M. Lobovsky. (2017). *MATERIAL DATA SHEET Standard - CLEAR FLGPCL04*. FORMLABS MATERIALS LIBRARY. Formlabs https://formlabsmedia.formlabs.com/datasheets/Standard-DataSheet.pdf. abgerufen am 27. 06. 2022

IEC 60068-2-30. (2005). *Environmental testing – Part 2-30: Tests – Test Db: Damp heat, cyclic (12 h + 12 h* cycle). INTERNATIONAL STANDARD

DIN EN 13018. (2016). *Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 13018:2016*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V

IEC 60068-2-38. (2009). *Environmental testing – Part 2-38: Tests – Test Z/AD: Composite temperature/humidity cyclic test*. INTERNATIONAL STANDARD

A. Cable (2024). LD2297 - N-SF11 Bi-Concave Lens. Thorlabs https://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=LD2297 abgerufen 07.2024

A. Cable (2024). LD2297 - N-SF11 Bi-Concave Lens. Thorlabs https://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=LD2297 abgerufen 07.2024

JOSIP VIDOVIĆ



Josip Vidović B.SC.

Continental Automotive Austria GmbH, Dresdner Straße 91 · 1200 Wien,
+43-676-3085701, josip.vidovic@continental.com

Reife- und Diplomprüfung 2014, Bachelor-Studium „Mechatronik und Mikrosystemtechnik“ an der FH Wiener Neustadt 2015 bis 2019, Master-Studium „Mechatronik“ an der FH Wiener Neustadt seit 2019



FACHHOCHSCHULE WIENER NEUSTADT

University of Applied Sciences – Austria

ISBN 978-3-200-10322-1



Fachhochschule Wiener Neustadt GmbH
University of Applied Sciences

Johannes Gutenberg-Straße 3, 2700 Wiener Neustadt, Austria
+43 (0) 26 22 | 89 0 84 - 0 | office@fhwn.ac.at | fhwn.ac.at

Herausgegeber: Studiengang Mechatronik
Foto-Credits © FH Wiener Neustadt GmbH, adobe.stock