

Vorlauf- forschung

2025

Vorwort Vorlaufforschung 2025



Liebe Leserinnen, liebe Leser,

auch 2025 war für die Forschung an unserer Hochschule wieder ein sehr erfolgreiches Jahr. Herausragend waren dabei vor allem zwei Ereignisse im Herbst. Im September wurde der von Kolleginnen und Kollegen aus den Fakultäten Informatik, Sozialwissenschaften und Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik sowie der Nürnberg School of Health beantragte DFG-Forschungsimpuls (Deutsche Forschungsgemeinschaft) SPEECHES bewilligt. Zusammen mit dem bereits 2024 an der Ohm gestarteten Forschungsimpuls DuraFuelCell sind somit von den 15 in Deutschland von der DFG bewilligten Forschungsimpulsen gleich zwei an der Ohm angesiedelt. Welch eine schöne Auszeichnung für die Forschenden unserer Hochschule! Das zweite herausragende und sehr erfreuliche Ereignis fand zwei Monate später statt, als wir im November mit dem Ohm Innovation Center unser langersehntes Forschungsgebäude eröffnen konnten, das in den nächsten Jahren vielen Forschenden mit moderner Laborausstattung erstklassige Rahmenbedingungen für ihre Forschungsaktivitäten bieten wird.

Neben den beiden genannten Highlights konnten wir uns über viele weitere Ereignisse freuen. Im Nürnberger Land eröffneten wir unser zweites Technologietransferzentrum, unsere 2024 gegründeten Promotionszentren nahmen mit der Aufnahme der ersten Promovierenden Fahrt auf, Fachtagungen fanden an unserer Hochschule statt, Drittmittelprojekte wurden eingeworben, Forschungslücken geschlossen und Ergebnisse veröffentlicht. Basis für jede Forschungsaktivität ist immer eine Forschungs idee. Und bei der Überführung solcher Forschungsideen in ein öffentlich gefördertes oder extern finanziertes Projekt soll die hochschulinterne Förderlinie der Vorlaufforschung unterstützen. Sie hat das Ziel, neue Forschungsaktivitäten an unserer Hochschule zu initiieren und somit die Forschung zu stärken. Die jährliche Ausschreibung richtet sich dabei sowohl an Neuberufene oder bislang erst wenig in der Forschung aktive Professorinnen und Professoren als auch an bereits gleichsweise gut etablierte Forschende, die teilweise schon in Instituten unserer Hochschule organisiert sind.

Für das Jahr 2025 sind aus neun Fakultäten insgesamt 33 Anträge auf Förderung eines Vorlaufforschungsprojektes eingegangen. Wie in den vergangenen Jahren bewertete eine interdisziplinär aus Mitgliedern des Sachverständigenausschusses Wissens- und Technologietransfer sowie weiteren Professorinnen und Professoren zusammengesetzte Begutachtungsgruppe die eingegangenen Anträge und wählte für 2025 neun Projekte für eine Förderung aus. Die Projekte wurden mit insgesamt 289.505 Euro unterstützt. Die bewilligten neun Anträge verteilten sich auf fünf Fakultäten.

Die im Berichtsjahr behandelten Themen zeigen wieder das breite Forschungsspektrum unserer Hochschule und machen zugleich deutlich, wie moderne digitale Verfahren in nahezu jedem Fachgebiet gewinnbringend eingesetzt werden. Man findet Fragestellungen aus der Verkehrstechnik genauso wie solche aus der Makromolekularen Chemie, der Produktionstechnik oder der Strömungsmechanik. Dazu gesellen sich Projekte aus den Forschungsschwerpunkten „Gesundheit“ und „Digitalisierung und Künstliche Intelligenz“. Festzustellen ist, dass bei allen Projekten der Vorlaufforschung Methoden der Künstlichen Intelligenz, der Simulation oder der Automatisierung eine große Rolle spielen.

Allen Projekten gemein ist die Anwendungsnähe, die die Forschung an der Ohm ganz allgemein kennzeichnet und auf deren Basis mit dem vor Ihnen liegenden Band beziehungsweise dem geöffneten Dokument einmal mehr beeindruckende wissenschaftliche Ergebnisse entstanden sind, zu denen den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zu gratulieren ist und die dazu beitragen, das Forschungsprofil unserer Hochschule weiter zu schärfen.

Hoffentlich werden auch die in diesem Band zusammengefassten Untersuchungen ihre Fortsetzung in interessanten Forschungs- oder Transferprojekten finden. Dass die gezeigten Ergebnisse hochspannend sind und eine Weiterverfolgung der Ideen aussichtsreich erscheint, werden Sie beim Lesen sicherlich selbst feststellen. Ich wünsche Ihnen Erkenntnisgewinn und viel Freude beim Studium der Berichte. Tauchen Sie ein in einen kleinen Ausschnitt der vielfältigen Aktivitäten der Forschenden unserer Hochschule.



Prof. Dr. Tilman Botsch
Vizepräsident für Forschung und Transfer

Inhalt

Vorlaufforschung 2025

Vorwort Vorlaufforschung 2025

3

Prof. Dr. Tilman Botsch
Vizepräsident für Forschung und Transfer

Strömungsakustische Konzeptstudie zur Analyse von Axialventilatoren, gefertigt mittels 3D-Prototyping

6

Prof. Dr.-Ing. Till Biedermann
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Free CNTs: Hochleistungsthermoplaste durch freie Carbon Nanotubes

13

Prof. Dr. rer. nat. Gerd Wehnert
Florian Bauer, M. Sc.
Dipl.-Ing. Herbert Schlachter, M. Eng.
Fakultät Angewandte Chemie/Lehr- und Forschungsgebiet für Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik

EgTAI

32

Prof. Dr. Timo Jakobi
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Ohm User Experience Center (Ohm-UX)

KnoSkel - Skelettierung von CT-Aufnahmen der Spongiosa für patientenspezifische Knochensimulationen

37

Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou
Elias Wagner, B. Eng.
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

ChatGPT als Studdy Buddy in der Programmierausbildung

45

Prof. Dr. Natalie Kiesler
Andreas Scholl, M. Sc.
Fakultät Informatik

| | |
|--|-----------|
| TrackVision – Erweiterter Wahrnehmungshorizont für automatisierte Rangierlokomotiven | 50 |
| Prof. Dr.-Ing. Christina Singer Dip.-Ing. (FH) Ralf Falgenhauer Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) | |
| <hr/> | |
| BELLU – Bordnetze in der elektrischen Luftfahrt | 68 |
| Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wagner Elias Berschneider, M. Eng. Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik | |
| <hr/> | |
| Virtual Industrial Digitalization Szenarios (VIDS) | 84 |
| Prof. Dr.-Ing. Philipp Gölzer Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik | |

Strömungsakustische Konzeptstudie zur Analyse von Axialventilatoren, gefertigt mittels 3D-Prototyping

Prof. Dr.-Ing. Till Biedermann
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Zusammenfassung:

Im Projekt wurde ein leistungsfähiger Prüfstand zur simultanen aerodynamischen und aeroakustischen Analyse von 3D- gedruckten Axialventilatoren entwickelt. Die Anlage ermöglicht reproduzierbare Messungen unter realitätsnahen Bedingungen und bietet hohe Flexibilität für verschiedene Prototypen. Aufbau, Mess- und Regeltechnik sowie akustische Optimierungen wurden umfassend realisiert. Der Prüfstand dient nun als zentrale Forschungsinfrastruktur, unterstützt Kooperationen, Abschlussarbeiten und Förderanträge und leistet einen signifikanten Beitrag zur zukünftigen Entwicklung leiser und effizienter Strömungsmaschinen.

Projektdaten

| | |
|------------------------------|--|
| Fördersumme | 25.620 Euro |
| Laufzeit | Januar bis Dezember 2025 |
| Fakultät | Maschinenbau und Versorgungstechnik |
| Projektleitung | Prof. Dr.-Ing. Till Biedermann |
| Projektteam | Dennis Kammerzelt, B. Eng., Tobias Mages, B. Eng. |
| Kontakt Daten Projektleitung | till.biedermann@th-nuernberg.de |

1. Ausgangslage

Die Reduktion von Emissionen im Sinne von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Stickstoffoxide (NO_x), Feinstaub, aber auch von Lärm stellt hochaktuelle gesellschaftliche und technologische Ziele dar. Die verwobenen Strukturen des modernen Wirtschaftens und Lebens verlangen nach interdisziplinären und multikriteriellen Ansätzen und Lösungen, um diesen Herausforderungen zu begegnen. So führt eine Erhöhung der energetischen Effizienz einer Strömungsmaschine nicht nur lediglich zu einem verringerten Verbrauch an Primärenergie, sondern trägt parallel beispielsweise auch zu einer Reduktion von Luftschadstoffen und einer Reduktion des abgestrahlten Schalls bei. In diesem Sinne sind auch die von der Europäischen Kommission (EU-Kommission) als Ziel formulierte Senkung der Schallemissionen von Flugzeugen um 65 Prozent bis 2050 (Referenz 2000) [1] als auch die in der EU-Direktive 327/2011 festgelegten Mindestwirkungsgrade für Ventilatoren [2] nicht isoliert voneinander, sondern vielmehr als gemeinsames Ziel zu betrachten. Die Tragweite dieser Forderungen, insbesondere in Bezug auf Ventilatoren, wird eindrücklich verdeutlicht, als dass das Umweltbundesamt den Energieverbrauch elektrisch angetriebener Ventilatoren in der Europäischen Union (EU) für 2020 mit 560 Terawattstunden prognostizierte [3], was einem Anteil von circa 23 Prozent (≈ 48 Millionen Tonnen Öläquivalent) der zur Verfügung stehenden elektrischen Gesamtenergie entspricht [4]. Das hier dargestellte Projekt zielt auf die Bereitstellung einer optimalen Mess- und Analyseumgebung zur Verbesserung der aeroakustischen Performance von axialen (und radialen) Ventilatoren, gepaart mit einer Erhöhung des aerodynamischen Wirkungsgrades, ab. Prinzipiell werden sich die gewonnenen Erkenntnisse jedoch auch auf gasfördernde Strömungsmaschinen im Allgemeinen anwenden lassen.

Konkret geht es um eine experimentelle Konzeptstudie zur umfassenden und simultanen aerodynamischen und akustischen Analyse von Niederdruck-Axialventilatoren, welche in Rohrleitungen/Kanälen verbaut werden (Be- und Entlüftungsventilatoren, Prozessgasventilatoren, Tunnelventilatoren, Klimatechnik et cetera). Insbesondere seit dem vermehrten Einsatz bionisch inspirierter Applikationen (leise Eulenflügel, Buckelwalfflossen, Haifischhaut, Handschwingen großer Vögel, Sharklets und vieles andere mehr) an Strömungsmaschinen mangelt es der wissenschaftlichen Community an Kenntnissen bezüglich der detaillierten Wirkmechanismen und der aerodynamischen/akustischen Implikationen dieser Applikationen in rotierenden Systemen. Um diese als Begeisterungsmerkmal schnell ökonomisch nutzbar zu machen, überholt die auf dem Markt angebotene Vielfalt schlicht den wissenschaftlichen Kenntnisstand. Die zugrunde liegenden Wirkmechanismen unter variablen Randbedingungen sind also oftmals noch nicht hinreichend durchdrungen, bedürfen jedoch einer passenden Test- und Analyseumgebung.

2. Ziele des Forschungsprojekts

Solcherart motiviert, soll im Rahmen der Vorlauforschung ein Konzeptprüfstand errichtet werden, welcher das Testen von kostengünstigen, aber qualitativ hochwertig gefertigten Prototypen axialer Ventilatoren ermöglicht. Die aerodynamischen und akustischen Eigenschaften sollen akkurat simultan erfasst werden, sodass die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse sowohl im Rahmen der Grundlagenforschung als auch von industrieller Seite von Relevanz sind. Testsetups sollen reproduzierbar/transferierbar sein und auch als Benchmarks für weitere Studien im Bereich Axialventilatoren dienen. In diesem Sinne wird ein

Leistungsprüfstand in Anlehnung an ISO 13347-1 [5] sowie DIN ISO 5801 [6] errichtet, zwei in der Community weithin akzeptierter Normen zur (Schall-)Leistungsvermessung von Ventilatoren. Das Vorhaben zeichnet sich insbesondere durch die folgenden Aspekte aus:

1. Simultane Vermessung der Aerodynamik und Akustik, was signifikant über den aktuellen Stand der existenten Normung bezüglich Leistungsprüfständen hinaus geht.
2. Großräumige Realisierung und minimale Strömungsgeschwindigkeiten, um akustische Messungen höchster Güte zu realisieren.
3. Hohe Flexibilität in der Einbindung verschiedener Prototypen-Geometrien.
4. Der Prüfstand soll über einen optischen Zugang von außen eine optionale Strömungsvisualisierung sowie den Einsatz von kontaktlosen laserbasierten Messverfahren (Particle Image Velocimetry (PIV), Laser Doppler Anemometry (LDA)) ermöglichen.

3. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde ein Leistungsprüfstand für Klein-Axialventilatoren entwickelt und realisiert. Der Fokus lag auf einer reproduzierbaren aerodynamischen und aeroakustischen Charakterisierung der Prüflinge unter normkonformen Bedingungen (ISO 5801/ ISO 13347-1), um sowohl grundlagenorientierte Forschung als auch anwendungsnahe Forschung zu ermöglichen. Die Herangehensweise umfasste sowohl konstruktive Maßnahmen beim mechanischen Aufbau des Versuchsraums als auch die Integration einer umfassenden Mess- und Regeltechnik. Das resultierende Konzept ist Abbildung 1 zu entnehmen.

Aufbau des Versuchsraums

Der Versuchsraum beziehungsweise die Messkammer wurde unter Mitwirkung des Laboringenieurs für Schall- und Schwingungstechnik Dennis Kammerzelt, B. Eng., sowie der wissenschaftlichen Hilfskraft Tobias Mages, B. Eng., vollständig in Eigenarbeit realisiert. Da die verwendeten Gipsplatten (OSB-)Platten bauartbedingt keine ausreichende Gasdichtigkeit aufweisen, wurde besonderes Augenmerk auf eine vollständige Versiegelung aller Innenflächen gelegt. Sämtliche Klebe- und Stoßkanten wurden zusätzlich abgedichtet, um unerwünschte Leckagen und damit Störungen der Messungen zu vermeiden.

Zur Minimierung von Gehäuseresonanzen und Strukturdröhnen erfolgte eine vollflächige Auskleidung des Innenraums mit Bitumenbahnen. Die akustische Dämpfung wurde durch den Einsatz von Basotect®-Akustikschaumstoff (Melaminschaum) weiter verbessert. Dieser erreicht einen Schallabsorptionsgrad von $\alpha \geq 90$ Prozent bis zu einer Grenzfrequenz von $f \geq 250$ Hz sowie $\alpha \geq 50$ Prozent bis $f \geq 150$ Hz und ermöglicht somit eine deutliche Reduktion von Reflexionen und Nebengeräuschen innerhalb der Messkammer. Die Zugangstür wurde druckdicht ausgeführt, um während der Versuche konstante Strömungsbedingungen sicherzustellen und Leckagen zu vermeiden.

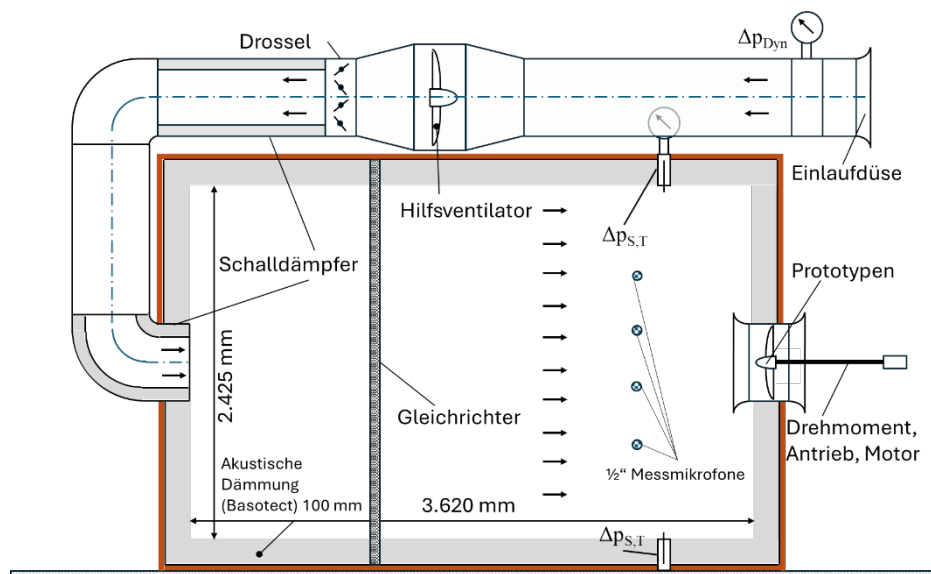


Abbildung 1: Leistungsprüfstand DIN ISO 5801 inklusive akustischer Auskleidung/Ohm, Baujahr 2025. Bild: Dennis Kammerzelt

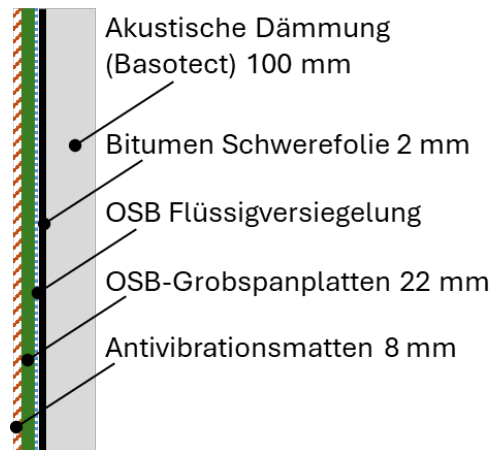


Abbildung 2: Aufbau der Prüfstandwandung zum Betrieb in gasdichter Ausführung. Bild: Till Biedermann

Zuströmstrecke und Hilfsventilation

Die Zuluftstrecke wurde mittels zweier in Serie geschalteter Rohrschalldämpfer akustisch behandelt. Dadurch konnten die Eigengeräusche der Zuströmung auf ein Minimum reduziert und die Qualität der aeroakustischen Messungen signifikant verbessert werden. Um die durch den Prüfstand entstehenden Druckverluste zu kompensieren und die Testbedingungen der Prüflinge nicht zu verfälschen, wurde zusätzlich ein Hilfsventilator in die Zuluftstrecke integriert. In Zusammenarbeit mit der ebm-papst GmbH wurde hierfür ein leistungsstarker, gleichzeitig jedoch sehr geräuscharmer Axialventilator zur Verfügung gestellt. Diese Maßnahme ermöglicht konstante und definierte Volumenströme auch bei hohen Strömungswiderständen der Prüflinge. Folglich können Prototypen entlang ihrer gesamten aerodynamischen Drosselkennlinie von einer Nullförderung bis hin zur Maximalförderung (Nulldurchlauf ohne Druckaufbau) getestet werden.

Mess- und Regeltechnik

Zur präzisen Einstellung der Betriebsbedingungen wurde eine mehrstufige Regeltechnik implementiert. Dazu zählen:

- die Drehzahlregelung des Antriebsmotors,
- die Drehzahlregelung des Hilfsventilators
- sowie eine Drosseleinrichtung in der Zuströmstrecke zur Feinjustierung des gewünschten Testvolumenstroms.

Die eingesetzte Messtechnik ermöglicht eine umfassende aerodynamische und akustische Analyse der Prüflinge. Erfasst werden:

- Drehmoment der Prototypen (Prüflinge) über eine Drehmomentmesswelle im Antriebsstrang zur Bestimmung der aufgebrauchten Wellenleistung,
- die Temperatur in der Messkammer (PT100),
- die statisch-totale Druckerhöhung der Prototypen,
- der Volumenstrom,
- die Drehzahl der Prototypen über die Messtechnik im Antriebsstrang
- sowie eine mehrkanalige Akustikmessung auf der Saugseite innerhalb der Messkammer zur Erfassung der emittierten Schalldruckpegel und Ableiten der Schalleistungspegel.

Antriebsstrang

Der Antrieb der Prüflinge erfolgt über einen Synchron-Elektromotor im Drehzahlbereich von 100 min^{-1} bis 4000 min^{-1} . Nachgeschaltet ist eine hochpräzise Drehmomentmesswelle, die über Metallbalgkupplungen mit dem Motor gekoppelt ist. Anschließend folgt eine Fest-/Loslagerung zur Aufnahme radialer und axialer Kräfte. Die Prototypen werden abschließend über formschlüssige Anschraubnaben auf der Antriebswelle montiert. Die Prototypen werden in einem mittels Kniehebelspannern demontierbaren Element in die Außenwandung der Messkammer eingebracht. Dies ermöglicht den einfachen und zielgerichteten Wechsel zwischen verschiedenen Geometrien bei gleichbleibendem Antriebsstrang. Die axialen Rotoren werden in

einer Messdüse montiert, wobei Spaltweiten ≤ 1 mm realisierbar sind (Abbildung 3 unten rechts, Abbildung 4 rechts). Die Fertigung der Messdüse mittels Rapid Prototyping in vier Segmenten wurde umfangreich erprobt, um Rundheit, Formhaltigkeit und Oberflächengüte zu gewährleisten.

Die resultierenden Innenmaße der Messkammer entsprechen L x B x H 3620 mm x 3700 mm x 2425 mm und nutzen den zur Verfügung stehenden Raum maximal aus. Dieses hohe Raumvolumen ist essenziell, um die vorliegenden Strömungsgeschwindigkeiten im Inneren der Kammer minimal zu halten, damit hochauflösende akustische Messungen ohne den Einfluss von Windgeräuschen möglich sind. Der Messaufbau wurde im Kellergeschoss des KA-Gebäudes realisiert, um Störpegel und Vibrationen minimal zu halten. Abbildung 3 verdeutlicht den Entstehungsprozess der Messkammer vom anfänglichen Ständerwerk hin zur Einbindung der Wandung, Entdröhnung mittels Bitumen-Schwerefolie und schlussendlichem Ausrüsten mit Akustikschaumstoff.



Abbildung 3: Evolution des Leistungsprüfstands DIN ISO 5801 im Eigenbau. Grundgerüst (oben links), Realisierung der Wandung (oben rechts), Einbringen der Bitumen-Schwerefolie zur Dämpfung (unten links) sowie der finalen 100-mm-BASOTECT®-Dämmung mit dargestelltem Prototyp zur Vermessung. (unten rechts). Bilder: Till Biedermann

Forschungsergebnisse

Im Rahmen der Realisierung des Leistungsprüfstands wurden umfangreiche Vorab-Analysen und Messungen bezüglich der Dichtigkeit, der Nachhallzeit mit den unterschiedlichen Wandschichten sowie dem Eintrag von Fremdgeräuschen durchgeführt. Nach Fertigstellung der Initialversion laufen derzeit erste Messungen im Rahmen von zwei Abschlussarbeiten, wo der Prüfstand unter anderem eingemessen und hinsichtlich der Messqualität beziehungsweise Regelbarkeit bewertet wird.

4. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die im Rahmen des Projektes geschaffenen infrastrukturellen und wissenschaftlichen Grundlagen gewährleisten eine hohe Nachhaltigkeit der erzielten Ergebnisse und eröffnen weitreichende Verwertungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten. Der entwickelte Leistungsprüfstand bildet dabei das zentrale Forschungselement und dient als dauerhafte Plattform für zukünftige Arbeiten im Bereich der aeroakustischen und aerodynamischen Ventilatoranalyse.

Ein erster wichtiger Schritt zur nachhaltigen Verwertung war die Einreichung einer Projektskizze im Rahmen der HAW-ForschungsPraxis, an der zwei industrielle Praxispartner sowie die Hochschule Coburg beteiligt sind. Der Prüfstand fungiert hierbei als Herzstück des geplanten Forschungsvorhabens und ermöglicht weiterführende experimentelle Untersuchungen unter industrienahen, gleichzeitig aber präzise kontrollierten Bedingungen. Zur Verstärkung der Forschungsarbeit sind zudem weitere Förderanträge denkbar (Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) und Allianz für Industrie und Forschung e.V. (AIF). In allen diesen Vorhaben ist der Einsatz des Leistungsprüfstandes fest vorgesehen, sodass sowohl eine kontinuierliche Auslastung als auch die Erweiterung der wissenschaftlichen Fragestellungen gewährleistet ist.



Abbildung 4: Leistungsprüfstand DIN ISO 5801 inklusive akustischer Auskleidung in fortgeschrittenem Zustand (links) sowie Darstellung des realisierten Antriebsstranges zum Betrieb einer weiten Bandbreite an Prototypen. Bilder: Till Biedermann

Aktuell läuft eine wissenschaftliche Kooperation mit der Università degli Studi di Padova, Italien, die die Vermessung und Analyse bionisch inspirierter Axiallüfter zum Ziel hat. Die gemeinsame Nutzung des Prüfstandes in diesem internationalen Kontext unterstreicht dessen Eignung als hochwertiges Forschungswerkzeug und legt den Grundstein für weitere fachliche Vernetzung.

Zusätzlich wurde unter dem Titel „Green Fans“ im Oktober 2025 ein Proposal für eine EU COST Action eingereicht. Ziel dieser Initiative ist es, die Forschung zu Ventilatoren und deren aeroakustischen, aerodynamischen sowie energetischen Aspekten europaweit zu bündeln und zu vertiefen. Durch die länder- und hochschulübergreifende Vernetzung sollen Synergien geschaffen, der Austausch zwischen Wissenschaft und Industrie gefördert und langfristige Kooperationen etabliert werden. Der im Projekt realisierte Leistungsprüfstand bildet dabei eine zentrale experimentelle Ressource innerhalb dieses europäischen Forschungsnetzwerks.

Darüber hinaus bildet der Prüfstand eine wichtige Basis für die akademische Qualifizierung. Derzeit werden drei Abschlussarbeiten am beziehungsweise mit dem Prüfstand durchgeführt, die sich mit unterschiedlichen Aspekten der aerodynamischen und akustischen Charakterisierung beschäftigen. Ergänzend dazu absolvierte ein Austauschstudierender der École Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ISAE ENSMA) in Poitiers (Frankreich) bereits von Juni bis September 2025 ein dreimonatiges Forschungspraktikum, bei dem der Studierende aktiv in den Prüfstandbau eingebunden war und diesen unter anderem auch hinsichtlich der Strömungswege numerisch abgebildet hat. Für die Zukunft ist vorgesehen, den Prüfstand verstärkt in den Studienbetrieb (Projekt- und Abschlussarbeiten) zu integrieren, um Studierenden

einen unmittelbaren Zugang zu fortgeschrittener Messtechnik und experimentellen Methoden zu ermöglichen. Damit trägt das Projekt nicht nur zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung bei, sondern stärkt die praxisnahe Ausbildung im Themenfeld der Strömungsmaschinen und Aeroakustik nachhaltig.

Ausblick

Der realisierte Leistungsprüfstand bildet die Grundlage für eine Vielzahl zukünftiger Forschungsarbeiten und wird im nächsten Schritt technisch weiter verfeinert. Geplant ist insbesondere eine automatisierte, stufenlose Einstellung des Betriebsvolumenstroms, die durch einen geregelten Stellmotor an der Drosseleinrichtung realisiert werden soll. Dies ermöglicht präzisere und zugleich effizientere Messabläufe und erhöht die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse.

Darüber hinaus sollen weitere wissenschaftliche Kooperationen angestoßen und bestehende Partnerschaften ausgebaut werden, um das Themenfeld der aeroakustischen und aerodynamischen Ventilatorforschung international weiter zu vernetzen.

Methodisch ist die Einbindung optischer Messverfahren vorgesehen, um Strömungsfelder und instationäre Phänomene hochaufgelöst zu erfassen. Ergänzend dazu ist die experimentelle Erfassung von Wanddruckschwankungen im Blattspitzenspalt mittels geeigneter Sensorik (zum Beispiel Kulite-Druckaufnehmer) geplant. Dies eröffnet neue Möglichkeiten zur Untersuchung komplexer dreidimensionaler Strömungsstrukturen und ihrer akustischen Konsequenzen. Zur weiteren Verbesserung der Messbedingungen ist zudem eine zusätzliche Schalldämmung beziehungsweise Einhausung des Antriebsstrangs vorgesehen. Dies soll sowohl die akustische Messqualität steigern als auch die Störgeräusche weiter reduzieren.

Danksagung

Die Realisierung solcherart Prüfstandsbauten sind nicht ohne die (fakultätsübergreifende) Unterstützung innerhalb der Hochschule möglich. Ein besonderer Dank gilt Joscha Beer (Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik) sowie Christian Ganser (Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik).

5. Literatur

[1] Europäische Kommission (2011): Flightpath 2050. Europe's vision for aviation; maintaining global leadership and serving society's needs, report of the High-Level Group on Aviation Research, Publ. Off. of the Europ. Union, Luxembourg.

[2] Europäische Kommission (2011): Verordnung (EU) Nr. 327/2011 der Kommission vom 30. März 2011 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW angetrieben, ELI: <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/327/oj>.

[3] Umweltbundesamt (2012): Hintergrund Ökodesign-Richtlinie Ventilatoren, Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, Dessau-Roßlau, www.umweltbundesamt.de.

[4] Eurostat (2022): Final Energy Consumption by Product (EU 27) in 2020, Zugriff 11/2025, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00123/settings_1/table?lang=en.

[5] ISO (2025): Fans - Determination of fan sound power levels under standardized laboratory conditions - Part 1: General overview (ISO 13347-1:2025-07).

[6] ISO (2008): Ventilatoren - Leistungsmessung auf genormten Prüfständen (ISO 5801:2017); Deutsche Fassung EN ISO 5801:2017.

Free CNTs: Hochleistungsthermoplaste durch freie Carbon Nanotubes

Prof. Dr. rer. nat. Gerd Wehnert

Fakultät Angewandte Chemie/Lehr- und Forschungsgebiet für Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik

Florian Bauer, M. Sc.

Fakultät Angewandte Chemie/Lehr- und Forschungsgebiet für Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik

Dipl.-Ing. Herbert Schlachter, M. Eng.

Fakultät Angewandte Chemie/Lehr- und Forschungsgebiet für Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik

Zusammenfassung:

In diesem Vorlaufforschungsprojekt sollten kommerzielle Carbon Nanotubes (CNTs), die bei der Synthese in Form verfilzter Agglomerate anfallen, durch das von uns entwickelte Additiv Polydinitrocarbonat (PDNC) funktionalisiert und vereinzelt werden, um eine möglichst feine Verteilung in der Polycarbonatmatrix (PC) zu erreichen. Ziel war es zu prüfen, ob die Vereinzelnung der CNTs („Free CNTs“) aus Agglomeraten eine Steigerung der mechanischen Festigkeit von PC/CNT-Kompositen ermöglicht. Hierzu wurden kommerzielle CNTs sowohl in reiner Form als auch als CNT/Polycarbonat-Masterbatch eingesetzt. Die CNTs wurden in Dichlormethan (DCM) dispergiert und mit gelöstem Polycarbonat vermischt; in einem weiteren Ansatz wurde zusätzlich PDNC zugegeben. Nach Entfernung des Lösungsmittels wurde die feste Mischung aus CNT/PC beziehungsweise CNT/PC/PDNC über einen Miniaturextruder mit Polycarbonat zu Bändern extrudiert. Die mikroskopische Analyse zeigte, dass der Zusatz von PDNC eine signifikante Verkleinerung der CNT-Agglomerate um circa 59 % bewirkt.

1. Projektdaten

| | |
|------------------------------|--|
| Fördersumme | 35.000 Euro |
| Laufzeit | Januar bis Dezember 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Angewandte Chemie Lehrgebiet für Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik |
| Projektleitung | Prof. Dr. rer. nat. Gerd Wehnert |
| Projektteam | Florian Bauer, M. Sc. Dipl.-Ing. Herbert Schlachter, M. Eng. Fiona Seedorf, B. Sc. |
| Kontakt Daten Projektleitung | gerd.wehnert@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

„Im Lehrgebiet Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik der TH Nürnberg sind mit der Polymerchemie sowie der Kunststofftechnik zwei Bereiche kombiniert, die an Hochschulen und Universitäten üblicherweise an unterschiedlichen Fakultäten beheimatet sind.

An Räumlichkeiten stehen Laboratorien für die Synthese und Analyse von Polymeren, für die Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen sowie ein Labor für Mikroskopie zur Verfügung.

Es können alle gängigen Polymere und Additive synthetisiert und analysiert werden (GPC, Spektroskopie, Viskosimetrie, thermische Analyse). Eine anschließende Aufbereitung der Polymere und Verarbeitung der Formmassen (Walzwerk, Presse, Extruder, Spritzgussmaschine) ermöglicht die Herstellung von Kunststoff-Prüfkörpern. Diese können dann mit unterschiedlichen Methoden charakterisiert werden (Licht- und Elektronenmikroskopie, Thermoanalyse, mechanische Prüfung). Das Personal besteht aus zwei Forschungsprofessoren, dem Laboringenieur und fünf weiteren, mit Drittmitteln finanzierten wissenschaftlichen Mitarbeiter/-innen. Neben Industrienaufträgen (Entwicklungsprojekten, Schadensanalysen) wird auch an staatlichen Förderprojekten gearbeitet. In den letzten Jahren förderte das Luftfahrtforschungsprogramm des BMW einige Projekte“ [7].

Seit Mai 2022 läuft das Luftfahrtforschungsprojekt „Biobasierte Faserverbundkunststoffe für die Luftfahrt“ (bio-Lufa), das im Jahr 2026 abgeschlossen wird. Im Projekt bio-Lufa werden biobasierte Epoxidharz-Faserverbundwerkstoffe für die Luftfahrt entwickelt, die petrochemische Komponenten ersetzen und dabei vergleichbare thermische Eigenschaften bieten, insbesondere eine hohe Glasübergangstemperatur. Dadurch bleibt die Festigkeit auch bei Temperaturen von mehr als 140 °C erhalten. Eine halogenfreie Flammfestigkeit wird durch stickstoff- und phosphorhaltige Flammschutzmittel erzielt. Zudem verfolgt das Vorhaben ein „Design for Recycling“-Konzept, das die selektive Spaltung von Epoxidharzen ermöglicht und so Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung fördert.

Ein weiteres Forschungsprojekt, das seit Januar 2024 läuft und Dezember 2026 abgeschlossen wird, ist das Teilvorhaben „Neue Materialien für lebensdauerbegrenzte Systeme“ (NeMeSyS) im Verbundprojekt DISKUS. Hierbei soll ein chemisches Recyclingverfahren für additiv-vernetzte Siliconelastomere entwickelt werden, um diese mit sicheren und umweltfreundlichen Reagenzien in ihre Ausgangsstoffe zurückzuführen und eine echte Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Zusätzlich werden selektiv spaltbare Gruppen in das Polymergerüst integriert, die unter milden Bedingungen aktiviert werden können, um die Materialien am Lebensende effizient zu zerlegen. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zu nachhaltigen Hochleistungsmaterialien in der Luftfahrt.

Von 2019 bis 2022 lief das Projekt „Hochfeste Verbundkunststoffe auf der Basis von Carbonfasern, Carbon Nanotubes und neuartigen Additiven für die Luftfahrt“ (CaEnA), was 2014 durch die Vorlauforschung der Hochschule ermöglicht wurde. Es konnte gezeigt werden, dass sich der technische Thermoplast Polycarbonat durch den Zusatz von 6 % CNTs und dem Zusatz von 6 % des speziell entwickelten Elektronenmangel-Aromaten Polydinitrocarbonat auf die mechanische Festigkeit des teuren Hochleistungsthermoplasten Polyetherimid verstärken lässt. Die Verstärkung war erheblich und erreichte beim Biege-E-Modul fast 50 % (Abbildung 3). Die Ergebnisse wurden bei der Zeitschrift Polymer Composites publiziert [1]. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, soll nun im Vorlauforschungsprojekt „Free CNTs“ das Potential der Carbon Nanotubes als Füllstoff für Polymere weiter untersucht werden.

„Carbon Nanotubes (CNTs) sind eine besondere Kohlenstoffmodifikation, die aufgrund ihres strukturellen Aufbaus eine außergewöhnlich hohe mechanische Festigkeit von bis zu 30.000 MPa erreichen. Dank ihrer geringen Dichte von nur 1,3 g/cm³ und ihrer hohen Effizienz als Füllstoff bei minimalem Gewichtsanteil eignen sich diese Nanopartikel ideal zur Verstärkung von Kunststoffen. Dadurch könnten neuartige, hochfeste Materialien für den zunehmend wichtigen Leichtbau entstehen.

Die praktische Nutzung von CNTs als Verstärkungsfüllstoff gestaltet sich jedoch schwierig. In aktuellen Reviews wird hervorgehoben, dass das Problem der homogenen Verteilung von CNTs in Kunststoffen nach wie vor nicht gelöst ist. [8, 9] Starke van-der-Waals-Kräfte zwischen den Partikeln sowie inkompatible Wechselwirkungen mit der Kunststoffmatrix führen zu einer ausgeprägten Agglomeratbildung (siehe REM-Aufnahme in Abbildung 1). Solche Agglomerate werden vom Kunststoff nur unzureichend benetzt, was die mechanischen Eigenschaften des Polymers sogar verschlechtern kann. Daher sind zwei Faktoren entscheidend: die Dispergierung der CNTs zu Einzelpartikeln und eine stabile Wechselwirkung zwischen Polymermatrix und Kohlenstoff-Füllstoff.

Ein vielversprechender Ansatz ist die nicht-kovalente Funktionalisierung. Dabei wird ein Phasenvermittler-Additiv eingesetzt, das sowohl mit den CNTs als auch mit dem Kunststoff eine starke Wechselwirkung eingeht. Die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Gerd Wehnert hat hierfür einen innovativen Lösungsansatz entwickelt, der bereits als Patent (DE 10 2015 102 553) angemeldet wurde [2]. Spezielle Elektronenmangel-Aromaten, die komplementäre Quadrupol-Momente ausbilden, ermöglichen besonders starke Bindungen an der CNT-Oberfläche. Diese sogenannten π - π -Wechselwirkungen zwischen Aromaten und kondensierten aromatischen Systemen sind in der Literatur gut dokumentiert [3], [4]. Die Funktionalisierung erfolgt in diesem Projekt bewusst nicht-kovalent über π - π -Wechselwirkungen, um die mechanischen Eigenschaften der CNTs nicht zu beeinträchtigen. Typischerweise wird die nicht-kovalente Funktionalisierung durch Ultraschallbehandlung in Lösung, gefolgt von Zentrifugation und Filtration, durchgeführt. Der Ultraschall dient dazu, Agglomerate aufzubrechen und die Nanoröhren voneinander zu trennen. Das geeignete Additiv lagert sich anschließend zwischen den CNTs an und verhindert eine erneute Agglomeration [5], [6] [7].

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das zentrale Ziel des Projekts besteht darin, kommerziell erhältliche CNTs (Typ NC7000™), der Firma Nanocyl (Sambreville, Belgien), die typischerweise in stark verknäuelten Strukturen vorliegen, zu vereinzeln und so eine möglichst homogene Einarbeitung in eine Polymermatrix zu ermöglichen. Als Basispolymer dient Polycarbonat. Die Homogenität der CNT-Verteilung wird mikroskopisch beurteilt, die mechanischen Eigenschaften sollen mittels Zug- und Biegeprüfung ermittelt werden. Das Projekt wird in drei Arbeitspakete unterteilt.

Das Ziel des ersten Arbeitspakets ist es, die Leistungsfähigkeit kommerziell erhältlicher Polymer/CNT-Compounds hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften sowie der Homogenität der CNT-Verteilung zu bewerten. Dazu wird zunächst ein Masterbatch der Firma Nanocyl (NC3100™), der 25 % CNTs in einer Polycarbonatmatrix enthält, untersucht. Aus diesem Material werden im Doppelschneckenextruder Granulate mit unterschiedlichen CNT-Gehalten (1 %, 3 % und 6 %) hergestellt. Zusätzlich wird das bereits entwickelte Additiv Polydinitrocarbonat in denselben Konzentrationen (1 %, 3 % und 6 %) zugemischt, um dessen Einfluss auf die Dispergierung und Stabilisierung der CNTs zu prüfen. Die so erzeugten Granulate werden im Spritzgussverfahren zu Prüfkörpern verarbeitet, die anschließend mechanisch getestet werden. Neben diesen Untersuchungen mit dem kommerziellen Masterbatch werden ergänzend eigene Ansätze zur homogenen Einarbeitung von CNTs in Polycarbonat verfolgt.

Ziel dieses zweiten Projektteils ist es durch die optische Begutachtung von Polycarbonatfilmen, welche in die Carbon Nanotubes (CNTs) eingebettet wurden, Rückschlüsse auf die Homogenität der CNT-Verteilung unter dem Einfluss verschiedener Additive zu ziehen. Dazu werden Polycarbonatfilme hergestellt, indem Polycarbonat zusammen mit niedermolekularen Aromaten – ausgestattet mit elektronenschiebenden oder elektronenziehenden Substituenten – sowie dem Additiv Polydinitrocarbonat in Dichlormethan gelöst wird. Anschließend werden die CNTs mittels Ultraschallsonotrode in dieser Lösung dispergiert, um Agglomerate aufzubrechen und eine möglichst gleichmäßige Verteilung zu erreichen. Nach dem Gießen der Dispersionen in Abdampfschalen und dem Verdampfen des Lösungsmittels entstehen Polymerfilme, deren CNT-Verteilung mikroskopisch und visuell bewertet wird, um den Einfluss der Additive auf die Dispergierung zu bestimmen.

Im letzten Projektschritt geht es um die Herstellung kleiner Mengen eines Polycarbonat/CNT-Compounds für die Extrusion am Miniextruder. Dabei wird eine Bandextrusionsdüse eingesetzt, die es ermöglicht, dünne Bänder zu extrudieren, die anschließend direkt unter dem Lichtmikroskop untersucht werden können, ohne dass die aufwändige Präparation von Dünnschnitten erforderlich ist. Für die Compound-Herstellung werden zunächst Dispersionen aus Polycarbonat, CNTs und Additiven in Dichlormethan mittels Ultraschallsonotrode erzeugt. Diese Dispersionen werden anschließend in Ethanol ausgefällt, um das Polycarbonat/CNT/Additiv-Gemisch zu isolieren. Nach dem Trocknen erfolgt die Extrusion des Materials über die Breitschlitzdüse und einen Zweiwalzen-Kalender, wodurch transparente Bänder entstehen, die sich unmittelbar mikroskopisch auf die Homogenität der CNT-Verteilung in der Polycarbonatmatrix analysieren lassen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

4.1 Allgemeines zu kommerziell erhältlichen Carbon Nanotubes (Typ NC7000)

„Carbon Nanotubes (CNTs) zeichnen sich durch außergewöhnliche mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften aus. Chemisch betrachtet handelt es sich um große kondensierte aromatische Systeme, die zu röhrenförmigen Strukturen aufgerollt sind. Die Integration von CNTs in eine Polymermatrix könnte die Herstellung hochwertiger Composite ermöglichen, die vielfältige Anwendungen vom Automobilbau bis zur Luft- und Raumfahrt abdecken. Trotz intensiver Forschungsbemühungen bleiben die bisher erzielten Ergebnisse deutlich hinter den theoretischen Erwartungen zurück und zeigen nur geringe Verbesserungen gegenüber unveränderten Polymeren. Die wesentlichen Herausforderungen liegen in den schwachen Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Polymer und CNT sowie in der ausgeprägten Agglomeration der Nanoröhren. Starke van-der-Waals-Kräfte und die gekrümmte, verfilzte Struktur der CNTs erschweren eine gleichmäßige Verteilung, sodass Agglomerate die mechanische Belastbarkeit des Komposits nicht vollständig übertragen und das Material sogar schwächen. Eine effiziente Dispergierung und Stabilisierung der CNTs in der Matrix ist daher eine Grundvoraussetzung für die Herstellung leistungsfähiger Epoxid-CNT-Komposite.

Zur Untersuchung der Morphologie der CNTs wurden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt. Im Projekt kamen CNTs der Firma Nanocyl (Sambreville, Belgien) vom Typ NC7000® zum Einsatz. Bei einer 3000-fachen Vergrößerung sind die Agglomerate deutlich erkennbar, mit Durchmessern von bis zu 100 µm. Bei noch höherer Vergrößerung lassen sich einzelne Nanoröhren identifizieren (siehe Abbildung 2) [7].

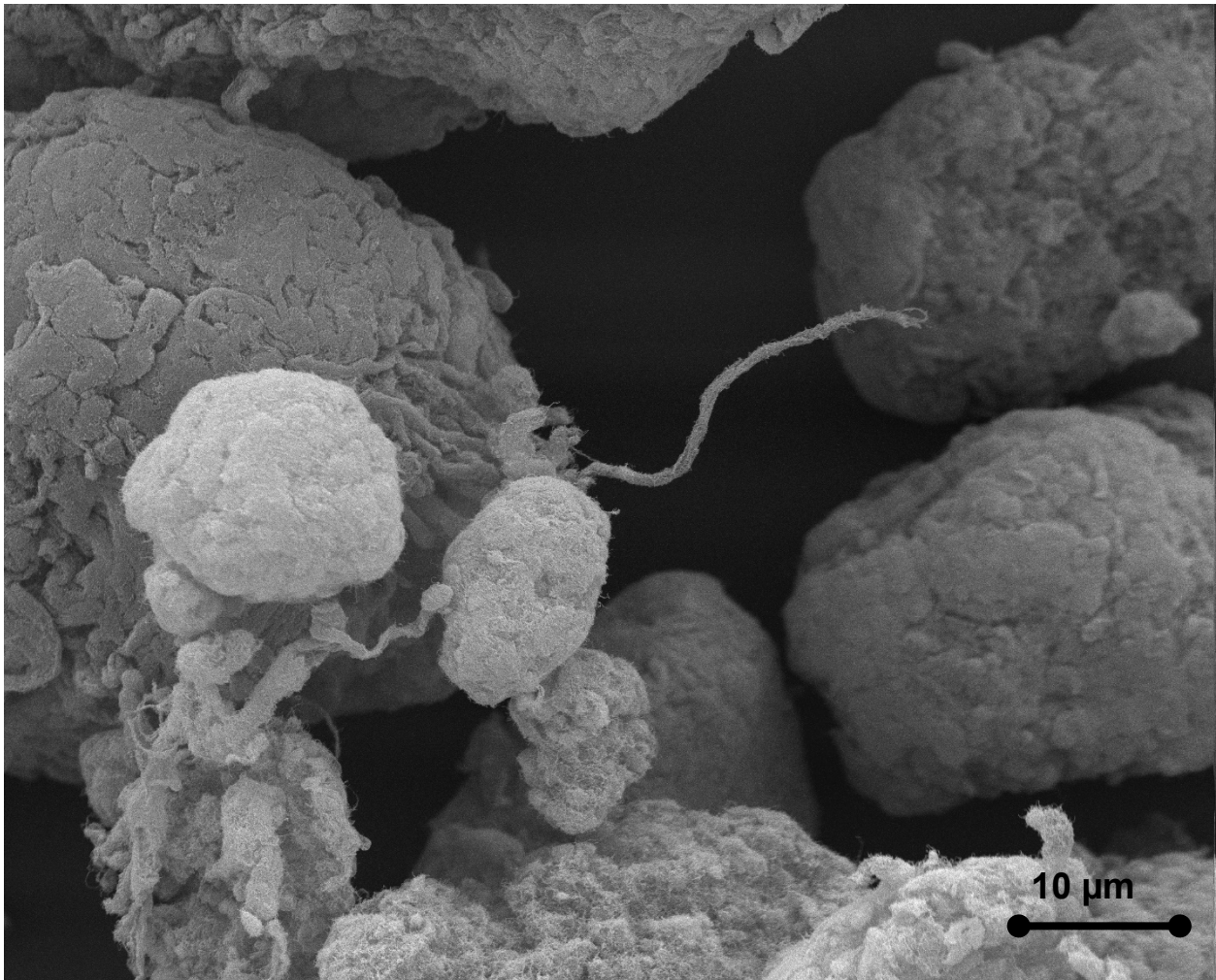


Abbildung 1: CNTs in 3000-facher Vergrößerung. REM-Aufnahmen 1 und 2: Christoph Bittner

„Die Aufnahmen zeigen, dass CNTs nicht wie in Modellvorstellungen als gerade Röhren vorliegen, sondern knäuelartige Strukturen bilden. Diese Knäuel entstehen durch ausgeprägte Schlaufenbildung einzelner Röhren, wie in Abbildung 2 sichtbar. Die gekrümmte Struktur deutet darauf hin, dass die CNTs nicht vollständig sp^2 -hybridisiert sind. Wären ausschließlich sp^2 -Bindungen vorhanden, wäre eine Drehung der Bindungen ausgeschlossen, und die Röhren wären gerade. Diese Erkenntnisse sind von großer Bedeutung, da sie die Modellstruktur widerlegen und verdeutlichen, dass die Vereinzelung der CNT-Knäuel deutlich komplexer ist als angenommen“ [7].

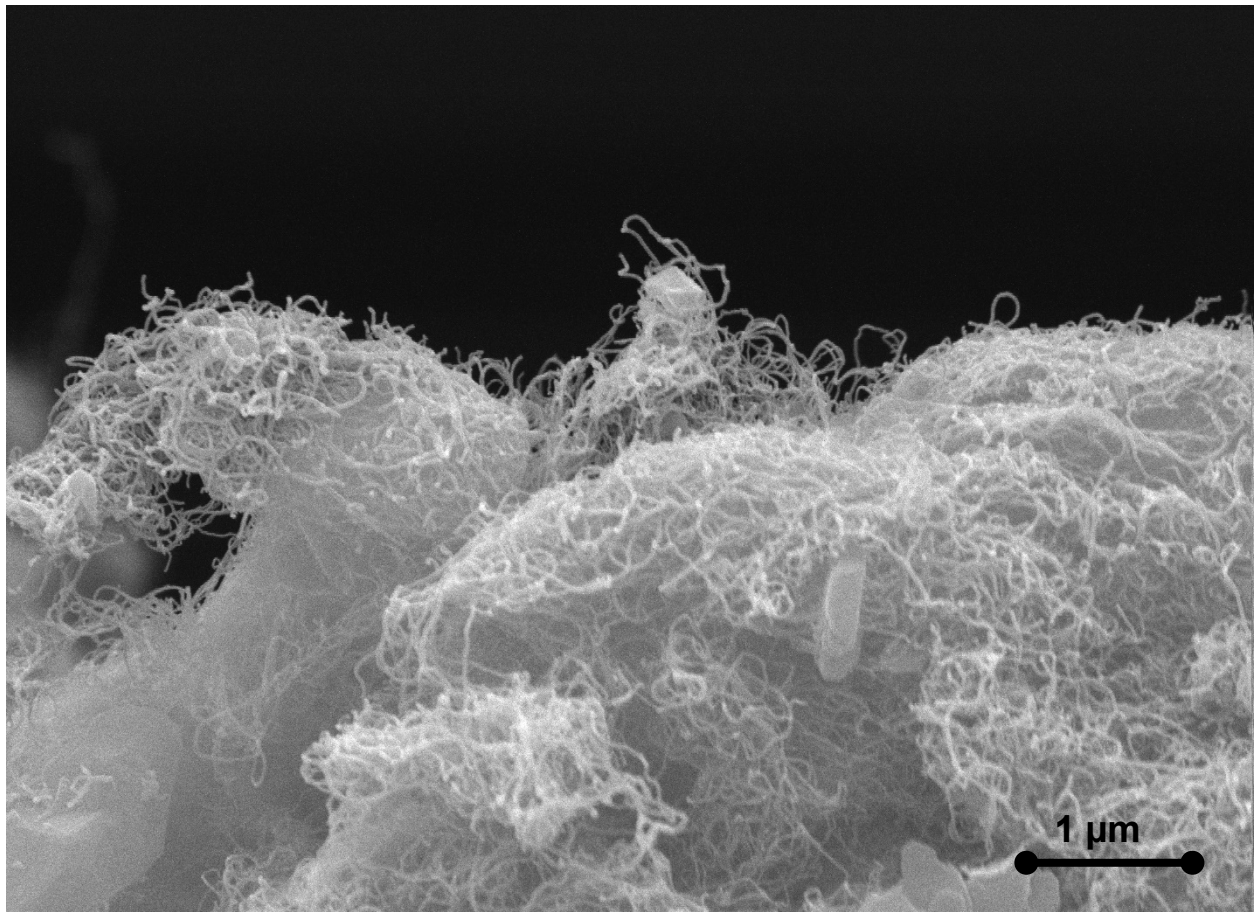


Abbildung 2: CNTs mit 25.000-facher Vergrößerung.

4.2 Bewertung kommerzieller Polycarbonat/CNT-Compounds

Zunächst wurden Prüfkörper mit einem kommerziell erworbenen Masterbatch als Referenzmaterial hergestellt. Es sollte überprüft werden, ob dieser Masterbatch in der Lage ist, ohne weitere Aufbereitung der enthaltenen CNTs die mechanischen Eigenschaften des Polycarbonats signifikant zu verbessern.

Es handelt sich hierbei um den Masterbatch PLASTICYL™ PC1507 des Herstellers Nanocyl. Dieser besteht aus Polycarbonat, das mit 15 % CNTs vom Typ NC7000™ gefüllt ist. Vom Hersteller liegen keine weiteren Informationen über eingesetzte Additive oder Funktionalisierungen vor. Als Polymermatrix wurde das Polycarbonat Makrolon 2605 des Herstellers Bayer eingesetzt. Das Additiv Polydinitrocarbonat wurde im Zuge des Calena-Projekts entwickelt und synthetisiert [1]. Das Additiv wurde durch Nitrierung von Polycarbonat mit konzentrierter Salpetersäure erhalten. Ein Ansatz gestaltete sich dabei so, dass in einer Dreihalskolben-Rückfluss-Rührapparatur 150 ml rauchende Salpetersäure vorgelegt und auf 0 °C temperiert wurde. Unter Rühren wurden 30 g Polycarbonat zugegeben. Nach einer Stunde Reaktionszeit und Aufarbeitung wurden 36 g Polydinitrocarbonat erhalten.

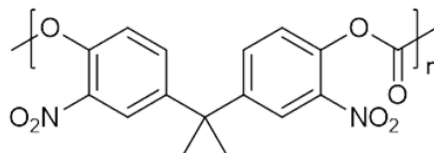


Abbildung 3: Strukturformel der Repetitionseinheit von Polydinitrocarbonat.

In einer ersten Versuchsreihe wurde das reine Polycarbonat zusammen mit verschiedenen Anteilen des Masterbatches am Doppelschneckenlaborextruder (Leistritz Micro 27 GL/GG) zu einem spritzgussfähigen Granulat verarbeitet. Eine zweite Versuchsreihe sah zusätzlich die Zugabe von Polydinitrocarbonat als Additiv in verschiedenen Anteilen zum Masterbatch vor. Die Zusammensetzung der Proben ist in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der extrudierten Granulate.

| Versuchsreihe | Probennummer | Massenanteil CNT / % | Massenanteil PDNC / % |
|---------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 |
| | 3 | 3 | 0 |
| | 4 | 6 | 0 |
| 2 | 5 | 0 | 1 |
| | 6 | 0 | 3 |
| | 7 | 0 | 6 |
| | 8 | 1 | 1 |
| | 9 | 1 | 3 |
| | 10 | 1 | 6 |
| | 11 | 3 | 3 |
| | 12 | 6 | 6 |



Abbildung 4: Strangextrusion von Polycarbonat (links) und hergestellte Granulate ohne CNTs (rechts). Bilder: Herbert Schlachter

Aus den extrudierten Granulaten wurden anschließend Prüfkörper spritzgegossen (Arburg Allrounder 270S).

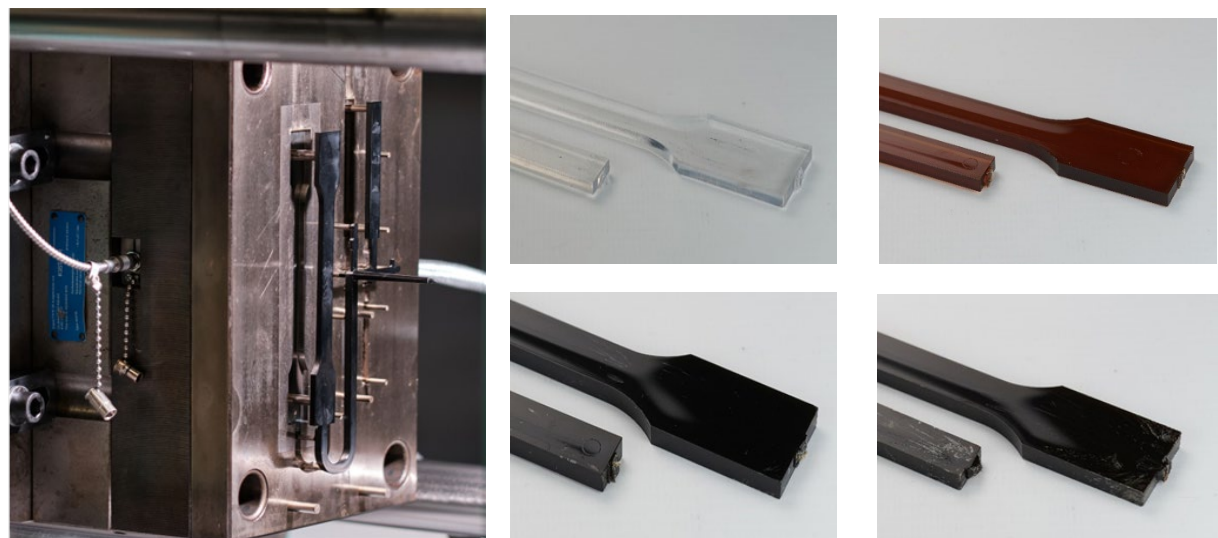


Abbildung 5: Spritzgusswerkzeug (links) und hergestellte Prüfkörper ohne CNTs (rechts). Bilder: Herbert Schlachter

Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte wurde eine Zugprüfung nach DIN ISO 526 und eine 3-Punkt-Biegeprüfung nach DIN ISO 178 durchgeführt. Es wurde die Zugprüfmaschine Z010 TN ProLine der Firma Zwick Roell (Ulm, Deutschland) verwendet.

4.2.1 Ergebnisse der Zugprüfung

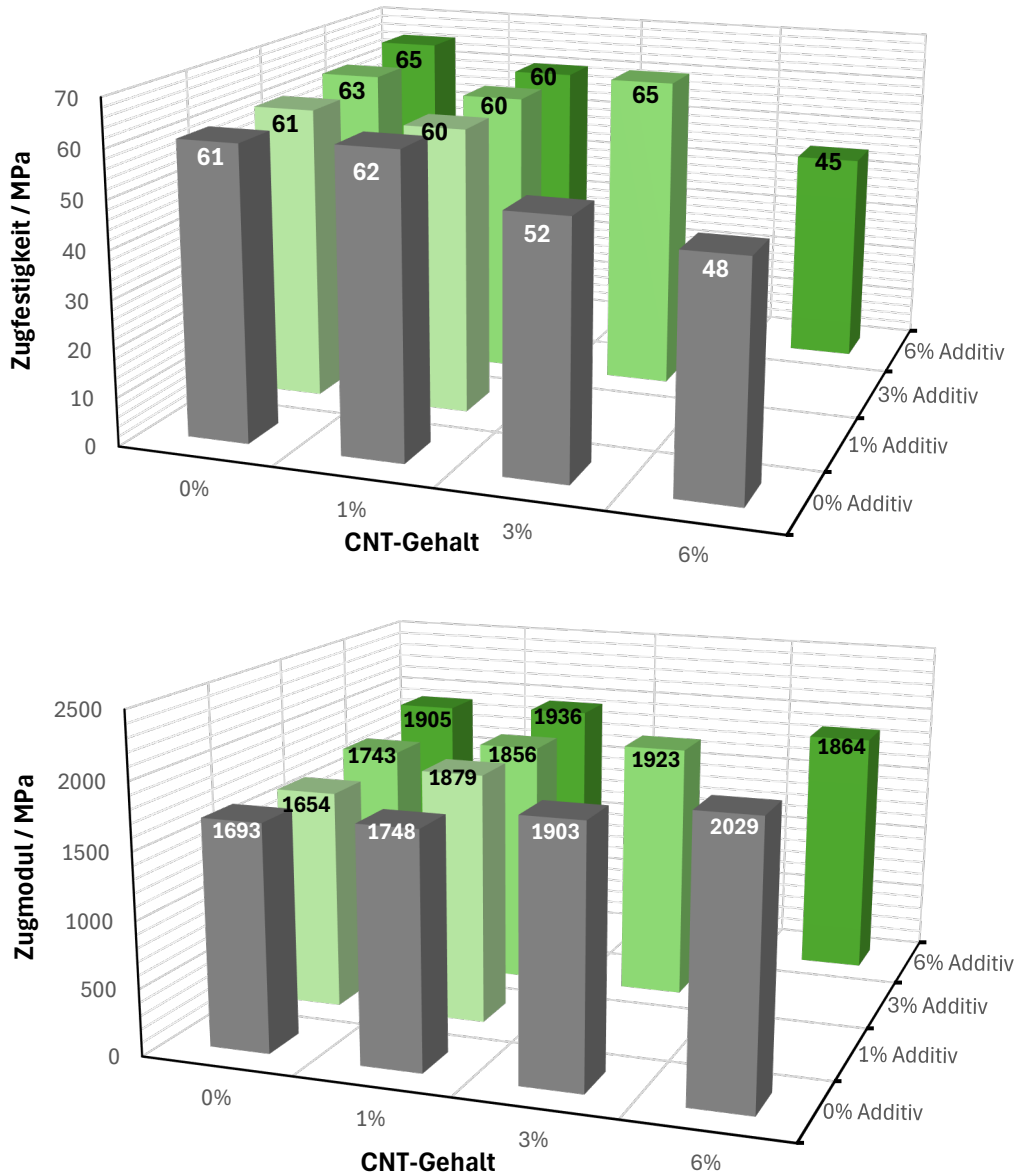


Abbildung 6: Ergebnisse der Zugprüfung.

Die Ergebnisse der Zugprüfung zeigen einen Einfluss des CNT-Gehalts auf den Zugmodul: Mit steigendem CNT-Anteil erhöht sich die Steifigkeit des Materials kontinuierlich. Während reines Polycarbonat einen Zugmodul von 1693 MPa erreicht, steigt dieser Wert bei 1 % CNTs um etwa 3 % auf 1748 MPa, bei 3 % auf 1903 MPa (+ 12 %) und bei 6 % auf 2029 MPa (+ 20 %). Die Zugabe des Additivs Polydinitrocarbonat zeigt hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Modul, außer bei reinem Polycarbonat, wo bei 6 % Additiv eine Erhöhung um 12 % beobachtet wird. Insgesamt lässt sich die Steigerung des Moduls primär auf den höheren Füllstoffgehalt zurückführen.

Die Zugfestigkeit zeigt ein gegenteiliges Bild: Reines Polycarbonat erreicht 61 MPa, fällt jedoch bei 1 % CNTs zunächst auf 62 MPa, bei 3 % CNTs 52 MPa und bei 6 % CNT-Gehalt auf 48 MPa. Dieser Rückgang kann durch Agglomeration der CNTs erklärt werden, die Schwachstellen im Polymer erzeugen und das

Material frühzeitig versagen lassen. Auch das Additiv zeigt in Kombination mit CNTs keinen positiven Einfluss auf die Festigkeit, die Festigkeit sinkt stark auf ein Minimum von 45 MPa bei 6 % CNTs und 6 % Additiv.

Diese Ergebnisse stehen im deutlichen Gegensatz zu früheren Untersuchungen, bei denen keine kommerziellen Masterbatches, sondern reine CNTs in Pulverform verwendet wurden [1]. In diesen Versuchen konnte bei einem maximalen CNT- und Additivanteil von 6 % sowohl eine deutliche Steigerung des Zugmoduls als auch der Zugfestigkeit erzielt werden.

4.2.2 Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung

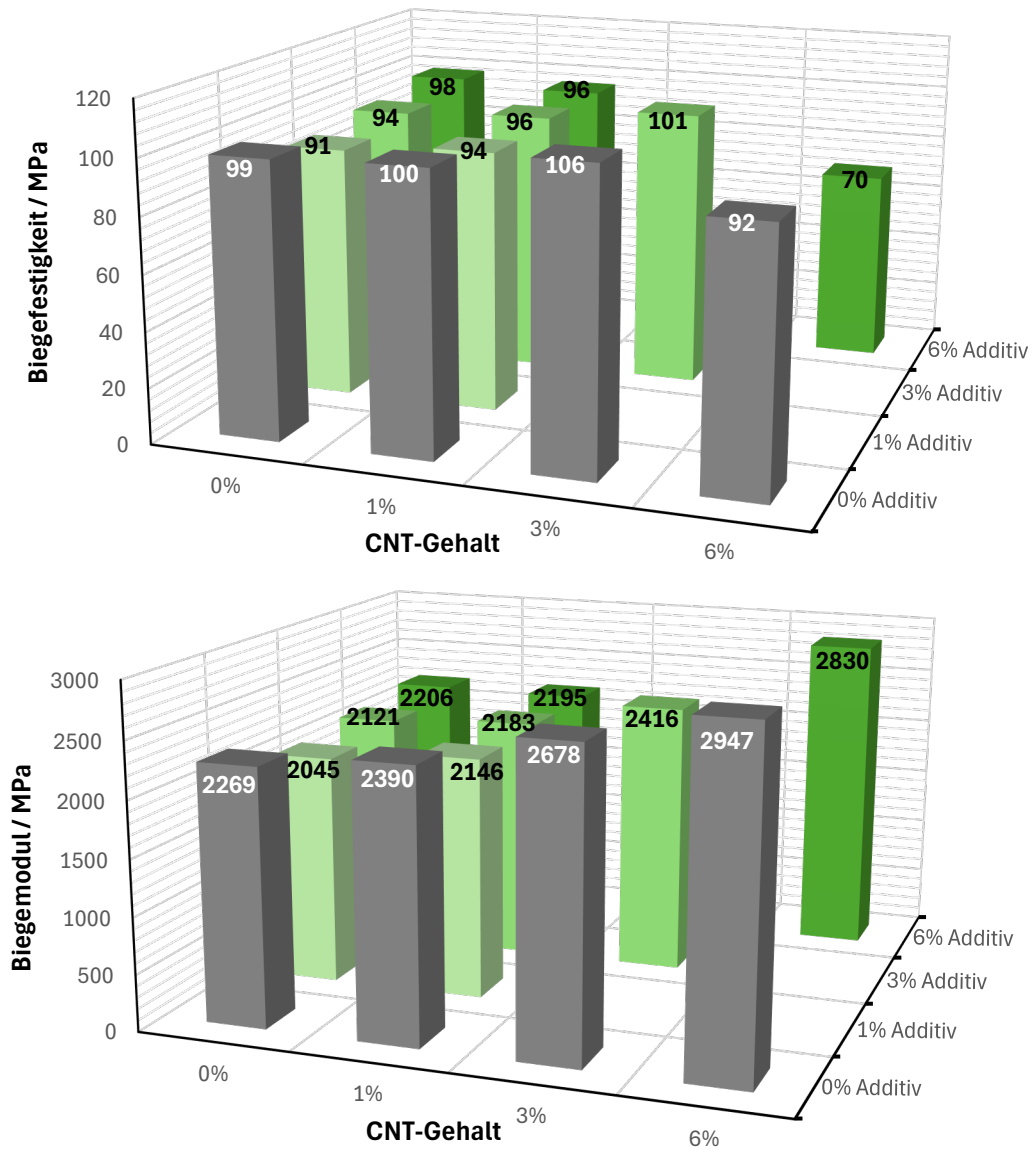


Abbildung 7: Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung.

Die Ergebnisse der Biegeprüfung zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Biegemoduls vom CNT-Gehalt: Reines Polycarbonat erreicht 2269 MPa, wohingegen der Wert bei 1 % CNTs auf 2390 MPa (+ 5 %) und bei 3 % auf 2678 MPa (+ 18 %) steigt. Bei 6 % CNTs beträgt der Biegemodul 2947 MPa (+ 30 %) und erreicht bei 9 % CNTs mit 3289 MPa eine Steigerung von rund 45 %. Diese Zunahme verdeutlicht die Ausbildung eines steifen Netzwerks durch die CNTs, das die Verformung unter Biegebeanspruchung erschwert. Die Zugabe des Additivs Polydinitrocarbonat zeigt hingegen keinen signifikanten Einfluss auf den Biegemodul. Zwar steigen die Werte bei reinem Polycarbonat mit höherem Additivgehalt leicht an, doch in Kombination mit CNTs bleibt der Effekt gering. Unterschiede zwischen einzelnen Proben sind vermutlich auf eine weniger erfolgreiche Homogenisierung während der Extrusion zurückzuführen.

Die Biegefestigkeit folgt einem ähnlichen Trend wie die Zugfestigkeit: Reines Polycarbonat erreicht 99 MPa, bei 1 % CNTs steigt der Wert leicht auf 100 MPa und bei 3 % auf 106 MPa. Ab höheren CNT-Gehalten sinkt die Festigkeit jedoch deutlich – auf 92 MPa bei 6 % und auf nur 50 MPa bei 9 %. Ursache hierfür ist die zunehmende Agglomeration der CNTs, die Schwachstellen erzeugt und zu vorzeitigem Bruch führt. Auch das Additiv kann diesen Effekt nicht kompensieren: Bei 6 % CNTs und 6 % Additiv fällt die Festigkeit auf 70 MPa.

Diese Ergebnisse der Biegeprüfung bestätigen den Trend, der bereits bei den Zugprüfungen beobachtet wurde: Während der Biegemodul mit steigendem CNT-Gehalt deutlich zunimmt, bleibt die Biegefestigkeit, ähnlich wie die Zugfestigkeit, bei höheren CNT-Konzentrationen deutlich hinter den Erwartungen zurück. Dies steht wieder im Gegensatz zu früheren Untersuchungen, in denen reine CNTs in Pulverform verwendet wurden. Hier konnte bei einem maximalen CNT- und Additivanteil von 6 % sowohl der Biegemodul als auch die Biegefestigkeit gesteigert werden [1].

Die ausbleibende Verbesserung beim Einsatz des kommerziellen Masterbatches lässt vermuten, dass die bereits vorhandene Einbettung der CNTs in die Polycarbonatmatrix eine effiziente Re-Dispergierung verhindert. Agglomerate, die während der Masterbatch-Herstellung entstehen, können durch die erneute Extrusion nicht vollständig aufgelöst werden und wirken als Schwachstellen, die Spannungskonzentrationen erzeugen. Zudem ist denkbar, dass die Wechselwirkung zwischen CNTs und dem Additiv im Masterbatch geringer ausfällt, da die CNT-Oberflächen bereits teilweise von der ursprünglichen Matrix abgeschirmt sind.

Damit wird deutlich, dass der untersuchte Masterbatch, unabhängig vom Zusatz des Polydinitrocarbonats, weder im Zug- noch im Biegeversuch geeignet ist, die mechanischen Eigenschaften von Polycarbonat signifikant zu verbessern. Für eine effektive Verstärkung scheint die direkte Einarbeitung von reinen CNTs in Kombination mit geeigneten Additiven die deutlich erfolgversprechendere Strategie zu sein.

Da die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die mechanische Verstärkung durch den Einsatz des kommerziellen Masterbatches ausbleibt, sind weitere Experimente erforderlich, um die Agglomerate der CNTs gezielt aufzubrechen und eine möglichst homogene Einarbeitung in die Polycarbonatmatrix zu erreichen. Das Ziel ist es, die typischen Knäuelstrukturen vollständig zu lösen und freie CNTs zu erhalten, die sich gleichmäßig in der Polymermatrix verteilen lassen.

Die zentrale Überlegung dabei ist, dass dieser Prozess nicht in der Polymerschmelze erfolgen kann, da die hohe Viskosität im Extruder die Auflösung der Agglomerate verhindert. Stattdessen muss in Lösung gearbeitet werden. Hier kann durch die deutlich geringere Viskosität eine bessere Mobilität der CNTs ermöglicht werden was die Wirkung mechanischer Dispergiermethoden wie Ultraschall begünstigt. Durch die Kombination aus Lösungsmittel, Ultraschallbehandlung und geeigneten Additiven könnte die Bildung stabiler Dispersionen erreicht werden, die eine Reagglomeration verhindern.

Als Lösungsansatz bietet sich die Herstellung von Polycarbonat/CNT-Dispersionen in einem geeigneten organischen Lösungsmittel wie Dichlormethan an. Hierbei können niedermolekulare Aromaten mit elektronenschiebenden oder elektronenziehenden Substituenten sowie das Additiv Polydinitrocarbonat eingesetzt werden, um die Wechselwirkung mit den CNT-Oberflächen zu optimieren. Nach der Dispergierung mittels Ultraschallsonotrode wird das Lösungsmittel entfernt, sodass ein Polymerfilm entsteht.

4.3 Einfluss verschiedener Additive auf die CNT-Dispersion in Polycarbonatfilmen

Zur Herstellung der Polycarbonatfilme wurde zunächst eine Referenzprobe angefertigt, die ausschließlich aus Polycarbonat (100 mg) und Carbon Nanotubes (10 mg) bestand. Diese diente als Vergleichsbasis für zwei Versuchsreihen. In der ersten Reihe wurden zusätzlich niedermolekulare Aromaten wie Dinitrophenol (DNP, 10 mg) oder Diaminobenzol (DAB, 10 mg) zugegeben, um deren Einfluss auf die Dispersion der CNTs zu untersuchen. In der zweiten Versuchsreihe wurde Polycarbonat (100 mg) mit dem Additiv Polydinitrocarbonat (20 mg) kombiniert. Hierbei wurden sowohl Proben hergestellt, die ausschließlich CNTs enthielten, als auch solche, die zusätzlich mit DNP oder DAB versetzt waren. Alle Mischungen wurden in 50 ml Dichlormethan gelöst, die CNTs mittels Ultraschallsonotrode (UP400St, Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Deutschland) dispergiert. Dabei wurden die Proben je dreimal für 2 Minuten – mit je 2 Minuten Pause – direkt mit einer Sonotrode bei einer Amplitude von 80 % und mit pulsierendem Zyklus beschallt. Es wurde

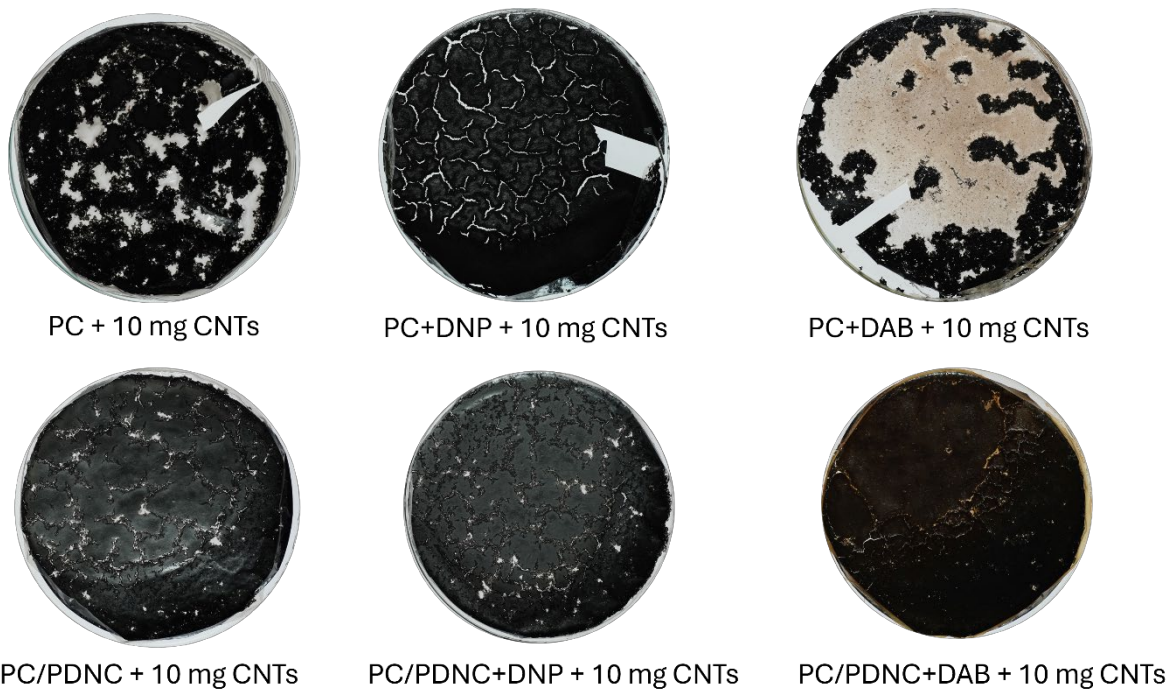


Abbildung 8: Polymerfilme aus Polycarbonat und CNTs mit unterschiedlichen Additiven. Bilder: Florian Bauer

mit einer Frequenz von 24 kHz gearbeitet. Der Ultraschallprozessor ist zu einer Leistung von 400 Watt fähig. Es wurde mit 50 % der maximalen Leistung gearbeitet. Nach dem Abdampfen des Lösungsmittels entstanden Polymerfilme, deren Homogenität der CNT-Verteilung optisch bewertet wurde. Die Polymerfilme sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die Referenzprobe, bestehend aus reinem Polycarbonat und CNTs, zeigte eine sehr schlechte Dispergierung. Bereits mit bloßem Auge waren große, flockenartige Agglomerate erkennbar, die sich deutlich von der transparenten Matrix abhoben. Dieses Ergebnis verdeutlicht die grundsätzliche Herausforderung, CNTs ohne zusätzliche Hilfsstoffe homogen in einer Polymermatrix zu verteilen.

Die Zugabe von DNP führte zu einer verbesserten Verteilung. Der Polymerfilme wirkte insgesamt regelmäßiger, was darauf hindeutet, dass DNP die Reagglomeration nach der Ultraschallbehandlung hemmt.

Deutlich schlechtere Ergebnisse wurden bei der Verwendung von DAB erzielt. Hier zeigte sich die stärkste Neigung zur Agglomeration. Die CNT-Bündel wurden an den Rand der Petrischale gedrängt, wodurch eine sehr ungleichmäßige Verteilung entstand.

Die Zugabe von PDNC führte zu einer deutlich verbesserten Dispersion im Vergleich zur Referenz. Dies legt nahe, dass PDNC die Wechselwirkungen zwischen den CNTs reduziert, respektive die Wechselwirkung zwischen dem Polycarbonat und den CNTs verbessert und somit die Ultraschalldispersion effektiver macht.

In der Kombination von PDNC und DNP zeigte sich eine ähnliche Verteilung der CNTs. Die Filme wirkten homogener als die Referenz. Dies deutet darauf hin, dass die beiden Additive ähnlich wirken und die Dispersion verbessern.

Schließlich wurde eine Probe untersucht, die zusätzlich zu PDNC auch DAB enthält. Makroskopisch war die Verteilung der deutlich CNTs besser als in der Probe ohne PDNC. Dies zeigt, dass der positive Effekt von PDNC die negativen Einflüsse von DAB kompensieren kann. Da hier die CNT-Verteilung am besten aussieht, könnte auch ein synergistischer Effekt vermutet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Dispersion der CNTs ohne Additive sehr schlecht ist. DNP bewirkt eine Verbesserung, während DAB die Verteilung deutlich verschlechtert. PDNC zeigt den größten positiven Einfluss, insbesondere in Kombination mit DNP.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll nun ein alternatives Verfahren zur Herstellung von PC/CNT-Compounds erprobt werden. Analog zur Filmbildung wird dabei zunächst eine Lösung des Polycarbonats in Dichlormethan verwendet, in der die CNTs mittels Ultraschallsonotrode dispergiert werden. Im Unterschied zur bisherigen Vorgehensweise sollen die hergestellten Mischungen jedoch nicht als Filme ausgegossen, sondern durch Ausfällen in Ethanol und anschließendes Trocknen zu Pulvern verarbeitet werden. Diese Pulver dienen als Ausgangsmaterial für die Weiterverarbeitung am Mini-Extruder, um daraus dünne Polymerbänder herzustellen. Diese Bänder sollen anschließend für eine detaillierte mikroskopische Auswertung genutzt werden, um die erzielte Dispergierung der CNTs im Compound zu beurteilen.

4.4 Herstellung von Polycarbonat/CNT-Compounds für die Bandextrusion

Für die Herstellung der Compounds wurden sowohl reines Polycarbonat als auch die in Abbildung 4 dargestellten Granulate mit 1 %, 3 % und 6 % PDNC verwendet. Zunächst wurden die CNTs (0,1 % bezogen auf die Polymermasse) in 250 ml DCM mittels Ultraschallsonotrode dispergiert. Die Vorgehensweise und Einstellungen der Sonotrode sind in Kapitel 4.3 beschrieben. Anschließend wurden 50 g des jeweiligen Granulats zugegeben und die Mischung für 72 Stunden gerührt. Nach dieser Phase erfolgte eine erneute Ultraschallbehandlung (5 x 2 min), um die Dispersion weiter zu homogenisieren.

Die hergestellten Dispersionen wurden zunächst mit Durchlichtbeleuchtung optisch auf ihre Homogenität überprüft (Abbildung 9). Die Aufnahmen in Abbildung 9 wurden nach einer Woche Lagerungszeit angefertigt.

Die optische Begutachtung der hergestellten Dispersionen zeigte deutliche Unterschiede in der Stabilität der CNT-Verteilung. Bei den Proben ohne Zusatz von PDNC war nach einer Woche Lagerung eine ausgeprägte Reagglomeration der CNTs zu beobachten. Die Dispersion wirkt inhomogen, es bildeten sich sichtbare dunkle Bereiche, die auf die Bildung größerer Agglomerate hindeuten.

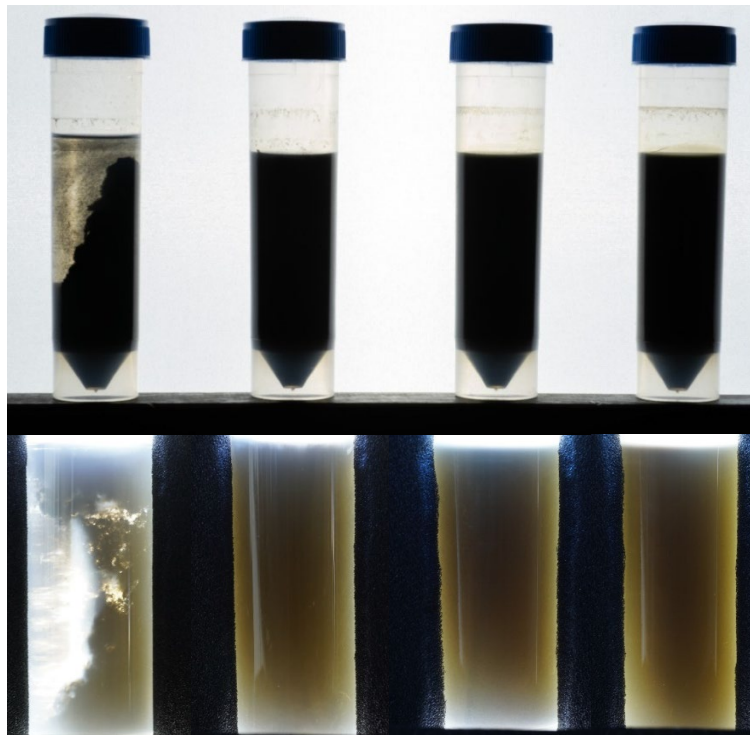


Abbildung 9: Dispersionen mit jeweils 0 %, 1 %, 3 % und 6 % PDNC (von links nach rechts) vor Softbox (oben) und im Durchlicht (unten).
Bilder: Florian Bauer

Im Gegensatz dazu blieben die Dispersionen, die PDNC als Additiv enthielten, auch nach einer Woche Lagerung optisch homogen. Auffällig war die starke Trübung der Dispersionen, sodass kein Licht mehr durch die Flüssigkeit hindurchstrahlen konnte. Dies deutet auf eine stabile Verteilung der CNTs im Lösungsmittel hin, die durch die Wechselwirkungen zwischen PDNC und den CNT-Oberflächen begünstigt wird. Die Ergebnisse unterstreichen die positive Wirkung von PDNC auf die Dispersionsstabilität und legen nahe, dass dieses Additiv eine Schlüsselrolle bei der Vermeidung von Reagglomeration spielt.

Im nächsten Schritt wurden die Dispersionen in Ethanol ausgefällt, das erhaltene Pulver getrocknet und anschließend am Miniatur-Zweischneckenextruder (paralleler Doppelschneckenextruder Thermo Fisher Process 11) mit Breitschlitzdüse und einer Zweiwalzen-Flachfolien-Nachfolgestrecke (Thermo Fisher) zu dünnen, transparenten Polymerbändern verarbeitet. Diese Bänder dienen der mikroskopischen Analyse, um die Qualität der CNT-Dispergierung im Compound zu bewerten.



Abbildung 10: Extrudierte Bänder mit 0 % (Referenz), 1 % und 3 % PDNC (von links nach rechts) sowie jeweils 0,1 % CNTs. Bild: Florian Bauer

Bei der Betrachtung der in Abbildung 10 dargestellten extrudierten Bänder fällt auf, dass bei einem PDNC-Anteil von 3 % keine fehlerfreien Bänder mehr hergestellt werden konnten. Ursache hierfür ist vermutlich die beginnende thermische Zersetzung des PDNCs, die während der Extrusion zur Bildung von Gasblasen führt, die zu in Extrusionsrichtung elliptisch verformten Löchern im Band führen. Eine thermogravimetrische Analyse des Additivs bestätigt seine Zersetzung ab 270 °C (vergleiche Abbildung 11). Die Verarbeitungstemperatur liegt bei 260 °C, was durch die hohe Fließtemperatur des Polycarbonats von 240 °C bedingt ist.

Der optische Vergleich zwischen der Referenzprobe ohne PDNC und den Bändern mit 1 % PDNC zeigt eine homogenere Erscheinung bei Zugabe des Additivs. Auffällig ist, dass die Referenzbänder ohne Additiv eine ausgeprägte Streifenbildung aufweisen, die auf ungleichmäßig verteilte CNTs zurückgeführt werden kann. Zudem sind große Agglomerate mit bloßem Auge erkennbar. Im Gegensatz dazu zeigen die Bänder mit 1 % PDNC eine deutlich geringere Streifenbildung und keine sichtbaren Agglomerate, was auf eine verbesserte Homogenität der CNT-Verteilung hindeutet.

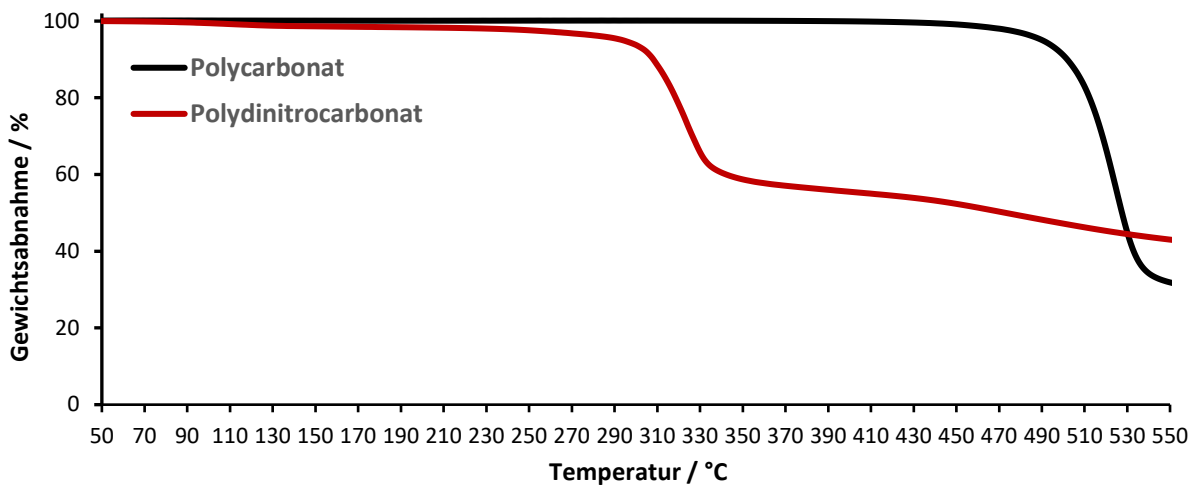


Abbildung 121: Thermogravimetrische Analyse von Polycarbonat und Polydinitrocarbonat

Von den Bändern konnten lichtmikroskopische Aufnahmen ohne weitere Probenpräparation angefertigt werden. Die Aufnahmen wurden mit einem Nikon-Eclipse-ME6000-Lichtmikroskop in Durchlicht-Hellfeldbeleuchtung angefertigt. Es wurde ein Objektiv mit fünffacher Vergrößerung und einer numerischen Apertur von 0,15 verwendet. Für die Fotoaufnahmen diente eine digitale Mikroskopkamera Nikon DS-Ri2. Für die Partikelgrößenanalyse wurde zunächst eine binarisierte Darstellung der mikroskopischen Aufnahmen mit hohem Kontrast erstellt. Die Auswertung der Partikelgrößenanalyse erfolgte anschließend über die NIS-Elements Software (Nikon). Die Farbbilder sowie die binarisierten Darstellungen sind in den Abbildungen 12 und 13 dargestellt. Die Foliendicke wurde mit einem Universal-Dickenmessgerät 16502 der Firma Frank-PTI bestimmt und betrug 60 μm für die Probe aus PC + 0,1 % CNTs und 50 μm für die Probe aus PC + 1 % PDNC + 0,1 % CNTs.

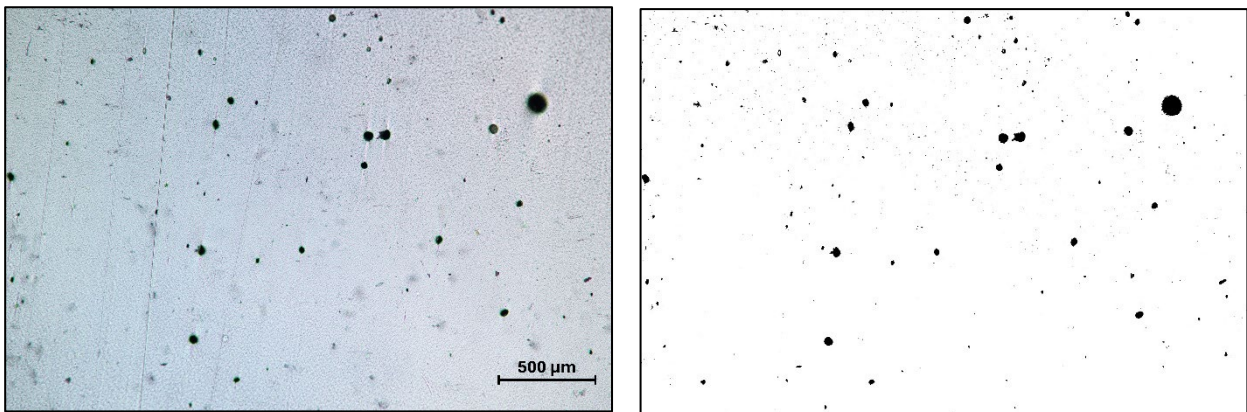


Abbildung 13: mikroskopische Aufnahme (Objektiv 5x / NA 0,15) der Probe aus PC + 0,1 % CNTs. Bilder: Florian Bauer

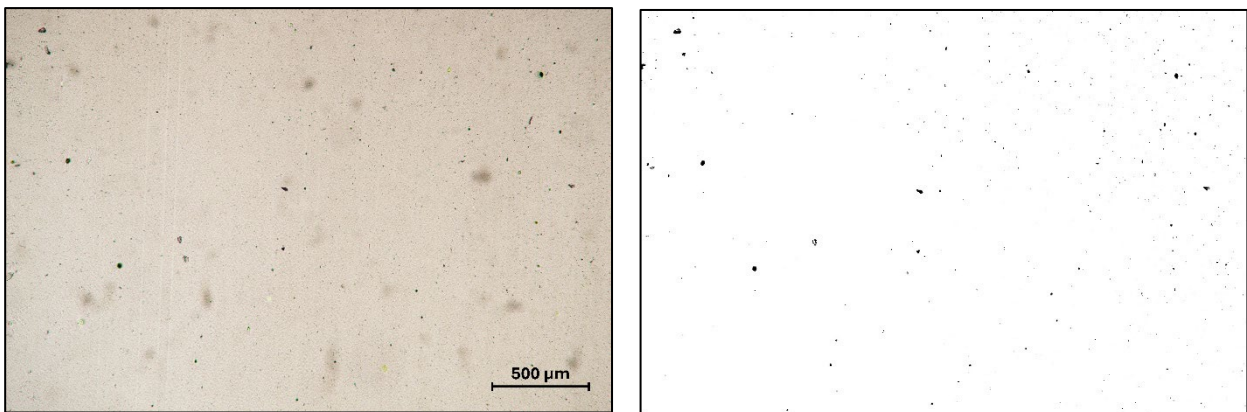


Abbildung 14: mikroskopische Aufnahme (Objektiv 5x / NA 0,15) der Probe aus PC + 1 % PDNC + 0,1% CNTs. Bilder: Florian Bauer

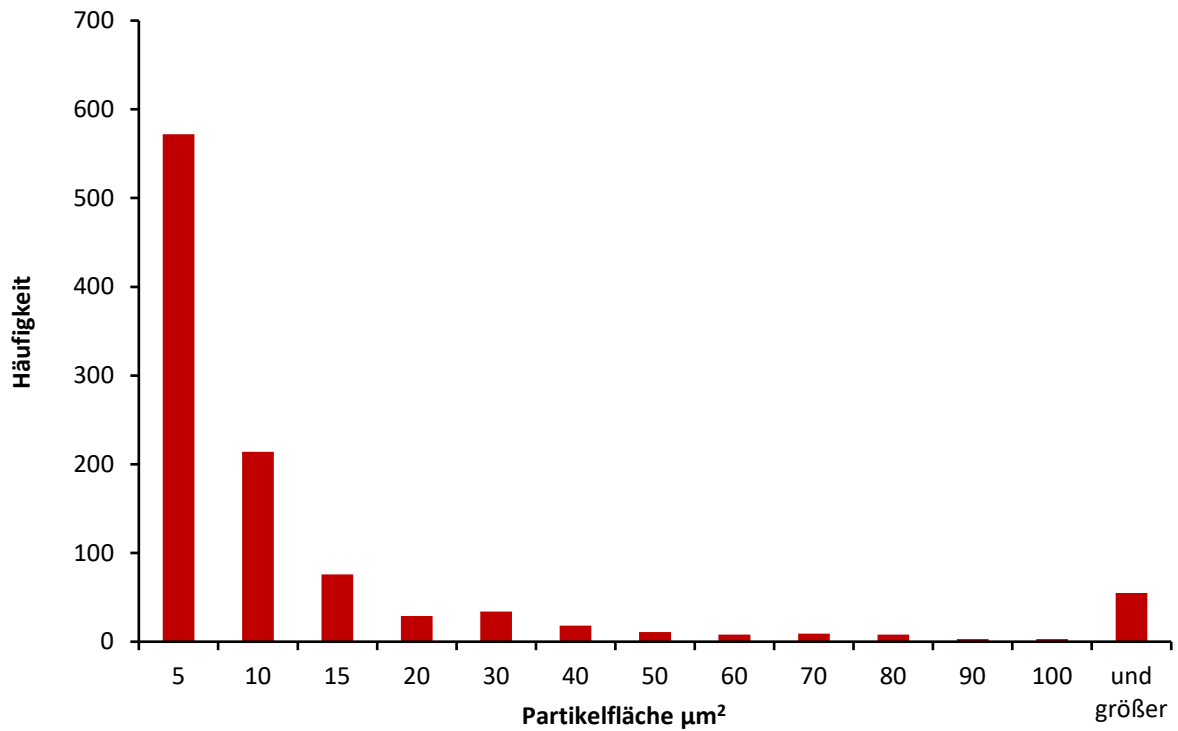


Abbildung 15: Partikelgrößenverteilung PC + 0,1 % CNTs.

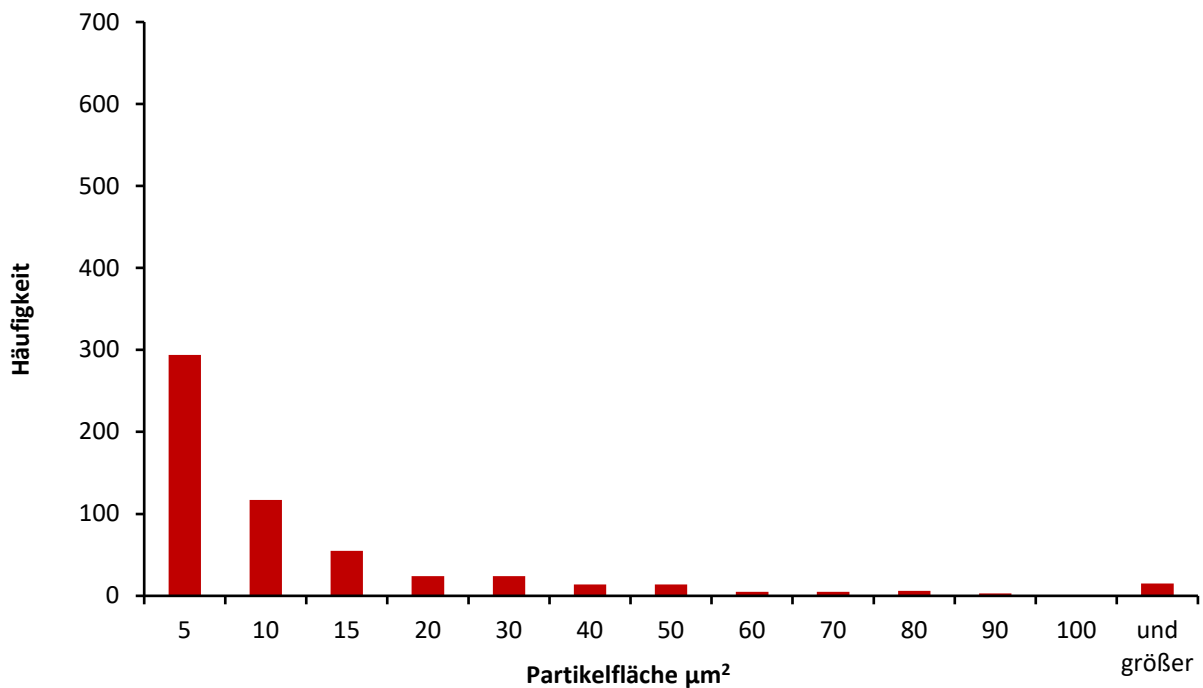


Abbildung 16: Partikelgrößenverteilung PC + 1 % PDNC + 0,1 % CNTs.

Tabelle 2: Kennwerte der Partikelgrößenverteilungen.

| Probe 0,1 % CNTs | Partikelanzahl / - | max. Partikelfläche / μm^2 | mittlere Partikelfläche / μm^2 | Median / μm^2 |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---|--------------------------|
| PC | 1040 | 7487,1 | 41,2 | 4,5 |
| PC + 1 % PDNC | 576 | 653,2 | 16,8 | 4,8 |

Die Partikelgrößenverteilung wurde exemplarisch an einer ausgewählten Stelle des extrudierten Bandes ermittelt. In den Abbildungen 12 und 13 sind dazu ein Originalbild sowie das entsprechende binarisierte Bild dargestellt. Die Partikelgrößenverteilungen der CNT-Agglomerate in Polycarbonat (0,1 % CNT) mit und ohne Additiv PDNC sind in den Abbildungen 14 und 15 dargestellt.

Der Zusatz von 1 % PDNC beeinflusst die Morphologie signifikant. In der Referenzprobe ohne Additiv wurden insgesamt 1040 Partikel bei einer Foliendicke von $d = 60 \mu\text{m}$ detektiert, wohingegen in der PDNC-haltigen Probe bei ähnlicher Foliendicke ($d = 50 \mu\text{m}$) lediglich 576 Partikel nachgewiesen wurden, was einer Reduktion der beobachteten Partikelzahl von circa 45 % entspricht.

Besonders deutlich zeigt sich die Wirkung des Additivs bei großen Agglomeraten: Die Anzahl der Partikel mit einer Fläche größer als $100 \mu\text{m}^2$ sinkt von 55 auf 15 (Reduktion um 73 %). Sehr große Agglomerate mit Flächen über $1000 \mu\text{m}^2$, die in der Referenzprobe mit 10 Partikeln auftreten, fehlen in der PDNC-haltigen Probe vollständig. Konsistent hierzu reduziert sich die maximal beobachtete Partikelfläche von $7487,1 \mu\text{m}^2$ auf $653,2 \mu\text{m}^2$, was einer Abnahme von 91 % entspricht.

Die mittlere Partikelfläche sinkt bei Zumischung von PDNC von $41,2 \mu\text{m}^2$ auf $16,8 \mu\text{m}^2$ (Reduktion um 59 %), während der Median mit $4,5 \mu\text{m}^2$ bzw. $4,8 \mu\text{m}^2$ nahezu konstant bleibt. Die Auswertung belegt damit eine ausgeprägte Dispergierwirkung von PDNC: Große und sehr große CNT-Agglomerate werden stark reduziert beziehungsweise vollständig vermieden, dabei bleibt die typische Partikelpopulation um den Median weitgehend unverändert.

Zur Bestätigung der Ergebnisse sind in Tabelle 3 weitere mikroskopische Aufnahmen von unterschiedlichen Stellen des Bandes gegenübergestellt, die die quantifizierten Unterschiede visuell sichtbar machen.

Die exemplarische Partikelgrößenanalyse liefert deutliche Hinweise darauf, dass der Zusatz von PDNC die Agglomerationsneigung von CNTs in Polycarbonat verringern kann. Die beobachtete Reduktion der Gesamtpartikelzahl sowie die starke Abnahme großer und sehr großer Agglomerate sprechen für eine verbesserte Dispersion. Da die Ergebnisse auch durch weitere mikroskopische Aufnahmen an unterschiedlichen Stellen gestützt werden, erscheint die Wirkung des Additivs plausibel. Dennoch sollten die Befunde durch weiterführende Untersuchungen bestätigt werden. Insbesondere müssen mechanische Prüfungen ergänzend zeigen, ob die optisch verbesserte Dispersion auch zu einer signifikanten Steigerung der Festigkeit führt.

Tabelle 3: Vergleich der mikroskopischen Aufnahmen (Objektiv 5x/ NA 0,15) ohne (links) und mit Additiv PDNC (rechts).
Bilder: Florian Bauer, Fiona Seedorf



5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die mechanischen Prüfungen an Prüfkörpern aus dem kommerziellen Masterbatch PLASTICYL™ PC1507 (15 % CNTs in Polycarbonat) zeigen, dass dieser für eine signifikante Verstärkung des Basispolymers Polycarbonat nicht geeignet ist. Ursache hierfür ist die ausgeprägte Agglomeration der CNTs im Masterbatch, die durch die erneute Extrusion nicht aufgelöst werden kann. Die Agglomerate wirken als Schwachstellen, die Spannungskonzentrationen erzeugen und zu vorzeitigem Versagen führen. Auch der Zusatz von PDNC zeigt in Kombination mit dem Masterbatch keinen positiven Einfluss auf die mechanischen Kennwerte, da die CNT-Oberflächen bereits durch die ursprüngliche Matrix abgeschirmt sind und die Wechselwirkung mit dem Additiv reduziert wird. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass kommerzielle Masterbatches für die Herstellung hochfester CNT-Komposite ungeeignet sind.

Für eine effektive Verstärkung ist die direkte Einarbeitung von reinen CNTs in Kombination mit geeigneten Additiven wie PDNC erforderlich. Dazu ist das Verfahren der Ultraschalldispersion in Lösung geeignet. Es konnten erfolgreich Polymerfilme extrudiert werden, deren mikroskopische Analyse eine signifikante Reduktion großer und sehr großer Agglomerate sowie eine deutliche Homogenisierung der CNT-Verteilung belegt. Damit ist die Grundlage geschaffen, um die mechanischen Eigenschaften von PC/CNT-Kompositen durch gezielte Additivierung nachhaltig zu verbessern. Das von uns entwickelte Additiv Polydinitrocarbonat führt zu einer Abnahme der mikroskopisch bestimmten CNT-Partikelflächen in Polycarbonat von im Mittel $41,2 \mu\text{m}^2$ auf $16,8 \mu\text{m}^2$, also zu einer Abnahme der CNT-Partikelgröße um circa 59 %. Wir sind damit dem Ziel, „free CNTs“ zu erzeugen, einen großen Schritt nähergekommen.

Für die weitere Forschung ergeben sich mehrere Ansatzpunkte:

- **Optimierung der Additivkonzentration:** Die Ergebnisse zeigen, dass bereits geringe Mengen PDNC (1 %) eine deutliche Wirkung entfalten. Höhere Konzentrationen (> 3 %) führen jedoch zu Verarbeitungsproblemen wie Gasblasenbildung durch thermische Zersetzung. Zukünftige Arbeiten sollten die maximal verarbeitbare Konzentration systematisch ermitteln.
- **Weiterentwicklung des Dispersionsverfahrens in Lösung:** Das bisher eingesetzte Ultraschallverfahren kann durch zusätzliche Schritte verbessert werden, beispielsweise durch den Einsatz eines Ultra-Turrax® zur intensiven Vorverteilung oder durch eine vorgeschaltete längere Behandlung der Lösungen im Ultraschallbad. Zudem können die Einstellungen der Ultraschallsonotrode (zum Beispiel Puls-Betrieb oder Dauerbetrieb) oder das zu dispergierende Volumen variiert werden.
- **Skalierung des Dispersionsverfahrens in Lösung:** Die lösungsmittelbasierte Dispersierung hat sich als effektiver Ansatz zur Agglomeratauflösung erwiesen. Im weiteren Schritt ist die Herstellung größerer Mengen an homogenem Compound erforderlich, um Prüfkörper für mechanische Tests im Spritzgussverfahren bereitzustellen.
- **Mechanische Charakterisierung:** Die mikroskopischen Ergebnisse müssen durch umfassende mechanische Prüfungen (Zug-, Biege-, Schlagzähigkeit) ergänzt werden, um den Einfluss der verbesserten Dispersion auf die Festigkeit des Materials zu quantifizieren.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Kombination aus Ultraschalldispersion und Additivierung mit PDNC in Lösung einen vielversprechenden Ansatz zur Herstellung homogener CNT-Komposite darstellt.

6. Literatur

- [1] Bauer, F., Söthje, D., Schlachter, H. & Wehnert, G., Mechanical Properties of Carbon Nanotube (CNT) Reinforced Polymers Using Electron-Deficient Aromatics as Additives, *Polymer Composites*, Vol. 45(14), S. 13180-13195, 2024.
- [2] Wehnert, G., Stecklein, K., Helbig, J. & Schlachter, H., Dispergier-Additiv, Schutzrecht DE 102015102553 A1 (auch angemeldet unter WO2016135152A1)v, 2015.
- [3] Hunter, C. A. & Sanders, J. K. M., The Nature of π - π Interactions, *Am. Chem. Soc.*, Vol. 112, S. 5525-5534, 1990.
- [4] Martinez, C. R. & Iverson, B. L., Rethinking the term “pi-stacking”, *Chem. Sci.*, Vol. 3, S. 2191-2201, 2012.
- [5] Tobias, G., Mendoza, E., Ballesteros, B., Functionalization of Carbon Nanotubes, *Encyclopedia of Nanotechnology*, Springer-Verlag, S. 911-919, 2012.
- [6] Strano, M. S., Moore, V. C., Miller, M. K., Allen, M. J., Haroz, E. H., Kittrell, C., Hauge, R. H., Smalley, R. E., The role of surfactant adsorption during ultrasonication in the dispersion of single-walled carbon nanotubes, *Journal of Nanoscience and Technology*, S. 81-86, 2003.
- [7] Wehnert, G., Söthje, D., Schlachter, H., Bauer, F., C-Mat – Carbon-nano-verstärkte Kunststoffmaterialien, Vorlaufforschungsbericht 2022, Schriftenreihe der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, 2022.
- [8] Sabet, M., Innovations in carbon nanotube polymer composites: Electrical, thermal, and technical advancements for aerospace and automotive applications, *Synthetic Metals*, Vol. 310, 117794, 2025.
- [9] Fenta, E. W. & Mebratie, B. A., Advancements in carbon nanotube-polymer composites: Enhancing properties and applications through advanced manufacturing techniques, *Heliyon*, Vol. 10, e36490, 2024.

EgTAI

Prof. Dr. Timo Jakobi

Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik (efi) / Ohm User Experience Center (Ohm-UX)

Zusammenfassung:

Das Projekt untersuchte, wie Unternehmen die Transparenzanforderungen des AI Act für hochriskante Künstliche-Intelligenz-(KI-)Systeme praktisch und rechtssicher umsetzen können. Im Fokus standen „digitale Gebrauchsanweisungen“, deren Kriterien (unter anderem Prägnanz, Klarheit, Verständlichkeit) schwer zu operationalisieren und teils widersprüchlich waren. Ein prototypisches Evaluationstool kombinierte algorithmische Analysen mit KI-gestützter Interaktion. Die Ergebnisse zeigten jedoch deutlichen Forschungsbedarf, insbesondere bei der Gewichtung konfligierender Kriterien, der Messbarkeit von Korrektheit und Vollständigkeit sowie der Entwicklung standardisierter, kontextsensitiver Bewertungsmodelle.

1. Projektdaten

| | |
|------------------------------|--|
| Fördersumme | 28.800 Euro |
| Laufzeit | Januar bis Dezember 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Ohm-UX |
| Projektleitung | Prof. Dr. Timo Jakobi |
| Projektteam | Julia Wolf, Elias Bergmann, Matia Kühn |
| Kontakt Daten Projektleitung | timo.jakobi@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

Systeme mit Künstlicher Intelligenz können für Unternehmen hohe Innovations- und Wertschöpfungspotentiale realisieren. Mit dem AI Act ist vor kurzem eine umfassende Regulierung in Kraft getreten. Die **Umsetzung von abstrakter Regulation stellt Unternehmen vor Herausforderungen** – beispielsweise im Bereich der Anforderungen an die „**Transparenz**“ von KI-Systemen.

Das Forschungsgebiet der Mensch-Maschine-Interaktionen verfügt über Ansätze, um mit Studien im Spannungsfeld von Industrie, Verbraucherinnen und Verbrauchern sowie Regulation dazu beizutragen, Umsetzungsmöglichkeiten solcher Anforderungen einerseits einfach umsetzbar und anwendbar und andererseits den regulatorischen Schutzzielen entsprechend zu definieren. An dieser Stelle setzt das vorliegende Projekt an und erforscht die Unterstützung in der Umsetzung der Transparenzanforderungen des erst kürzlich final formulierten AI Acts.

Der **AI Act** kennt drei Risikokategorien für Systeme mit Künstlicher Intelligenz, die sich entlang einer Risiko-Bewertung aufbauen. Es gibt Systeme mit niedrigem Risiko, wie beispielsweise Chatbots. Dann gibt es am anderen Ende der Skala verbotene Systeme, die ein sehr hohes Risiko beinhalten, die beispielsweise Emotionserkennung am Arbeitsplatz oder Social Scoring implementieren würden. Der Hauptteil der heutigen Anwendungen von KI fällt in das Raster der „hochriskanten KI-Systeme“. Für diese sieht der AI Act eine Reihe von Sicherheitsmechanismen vor. Einer dieser Mechanismen sind „digitale Gebrauchsanweisungen“. Diese sollen „prägnante, vollständige, korrekte und klare Informationen“ enthalten. Die Gebrauchsanweisungen sollen für Nutzende „relevant, zugänglich und verständlich“ sein.

Unternehmen, die KI-Systeme in Anwendung bringen, müssen eine optimale Rechtssicherheit nachweisen können, dass ihre Systeme diese Anforderungen erfüllen. Was zunächst nach alltagssprachlich verständlichen Anforderungen klingt, stellt im Detail allerdings eine erhebliche Herausforderung dar: Neben der Komplexität und Vielfalt der KI-Technologien selbst gilt es, Anwenderbedürfnisse abhängig vom Anwendungsbereich zu berücksichtigen. Es gibt also absehbar keine one-size-fits-all-Lösung, sondern je nach Kontext und Technologie unterschiedliche Lösungswege.

Grundsätzlich bestehen im Forschungsgebiet der „**explainable AI**“ Konzepte, um Transparenz über die Wirkungsweisen und Risiken von KI-Systemen herzustellen. Die konkreten Parameter vieler Mechanismen, wie sie aber im AI Act genannt werden (in unserem Pilotbeispiel: „prägnant“, „vollständig“, „korrekt“, „klar“, „relevant“, „zugänglich“ und „verständlich“) wurden in ihrer Kombination jedoch noch nicht in ihrer Bedeutung und Parametrisierung erforscht: Was macht eine Lösung beispielsweise aus Sicht verschiedener Stakeholder „prägnant“? Wie misst man Prägnanz zielführend? Es fehlen standardisierbare Werkzeuge, die Unternehmen in die Lage versetzen, die Erfüllung der Auflagen mit geringem Aufwand a) durchzuführen und b) nachzuweisen. Das stellt sowohl Aufsichtsbehörden als auch Unternehmen (insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU)) vor die Herausforderung, nicht über ein „Bauchgefühl“ hinaus prüfen zu können, welche Lösungen die Kriterien gut erfüllen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Projekt stellte eine erste Studie dar, die Anforderungen an den AI Act aus verschiedenen Perspektiven (Unternehmen, Aufsichtsbehörden, Verbraucherschutz) aufnahm und für den Bereich der „digitalen Gebrauchsanweisungen“ Lösungen konzipierte.

Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines Evaluationstools, das Unternehmen und Aufsichtsbehörden dabei unterstützen konnte, die Qualität der Gebrauchsanweisungen für hochriskante KI-Systeme zu überprüfen und sicherzustellen. Damit werden Unternehmen einfacher in die Lage versetzt, KI-Systeme rechtssicher zu betreiben. Zudem diente der Ansatz als Methodik, ins Gespräch mit Stakeholdern zu gelangen, um weitere Probleme und Ansatzpunkte zu identifizieren.

So sollten für weitere Forschungsprojekte Anforderungen für den gesamten AI Act in Bezug auf eine Unterstützung zum rechtssicheren und verbraucherfreundlichen Betrieb von KI identifiziert werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Für das gesamte **Vorgehen** wurde ein mensch-zentrierter Entwicklungsprozess genutzt, der explizit auf die Aufnahme und Vermittlung konfligierender Interessenslagen ausgerichtet ist.

1. Der theoretische Stand der Forschung sowie aktuelle Bedarfe wurden ermittelt. Dabei konnten die dominierenden Algorithmen und Herangehensweisen für eine Quantifizierung identifiziert werden.
 - a. Aus rechtlicher Perspektive zeigte sich die Problematik, dass die genannten Kriterien teils voneinander abhängig und miteinander verschränkt sind beziehungsweise in Konflikt stehen. Dies steht zwar nicht der Messbarkeit der einzelnen Komponenten entgegen, setzt für eine ausgereifte Evaluation allerdings ein Modell der Bewertung der Kriterien voraus, das die gegenseitige Einflussnahme quantifiziert.
 - b. Weiter zeigte sich, dass einige qualitative Ziele besser geeignet waren, durch Algorithmen gemessen zu werden, während andere durch ein vollautomatisiertes Evaluationsinstrument nicht sinnvoll abgebildet werden können.
 - i. Vor allem konnten Prägnanz, Klarheit, Relevanz und Verständlichkeit mit Algorithmen aus Natural Language Processing oder der Linguistik geprüft werden. Hier gab es bereits eine große Vielfalt möglicher Algorithmen aus denen gewählt werden kann.
 - ii. Korrektheit kann ohne Rückgriff auf interne Daten der Unternehmen nicht geprüft werden.
 - iii. Zugänglichkeit stellt eine eigene komplexe Prüfdimension dar, insbesondere vor dem eingeführten Barrierefreiheitstärkungsgesetz.
 - iv. Vollständigkeit konnte nur vor dem Hintergrund der Vorgaben des AI Acts selbst sinnvoll bewertet werden (Art. 13 (3)).
2. Es wurden Workshops mit Verantwortlichen in Unternehmen sowie möglichen Entwicklerinnen und Entwicklern sowie Betreiberinnen und Betreibern von Hoch-Risiko-KI-Lösungen durchgeführt. Hier zeigte sich in der Industrie ein insgesamt geringes Problembewusstsein. Weiterhin wurde skeptisch hinterfragt, inwieweit der AI Act und seine Vorgaben tatsächlich durchgesetzt werden würden.
3. In einem zweiten Schritt wurden die Erfahrungen im Anwendungsbereich der „digitalen Gebrauchsanweisung“ gemäß des AI Acts in ein prototypisches Werkzeug überführt. Unsere Konzeption fußte auf 2 Säulen:
 - a. einerseits die algorithmische Bewertung der Erfüllung der sieben Kriterien - soweit sinnvoll.
 - b. Andererseits eine durch generative KI geführte Interaktion, die Anwenderinnen und Anwender gezielt, aber flexibel dabei unterstützen sollte, eine bestehende Anleitung zu evaluieren und zu verbessern oder eine neue Anleitung zu erstellen.
4. Die entwickelten Prototypen wurden evaluiert. Sie dienten zudem dazu, allen Beteiligten einen Möglichkeitsraum aufzuzeigen, in dem Technologie unterstützen kann. In der Interaktion mit dem Tool wurden weitere, zukünftige Ausbaustufen und Umsetzungsmöglichkeiten diskutiert.

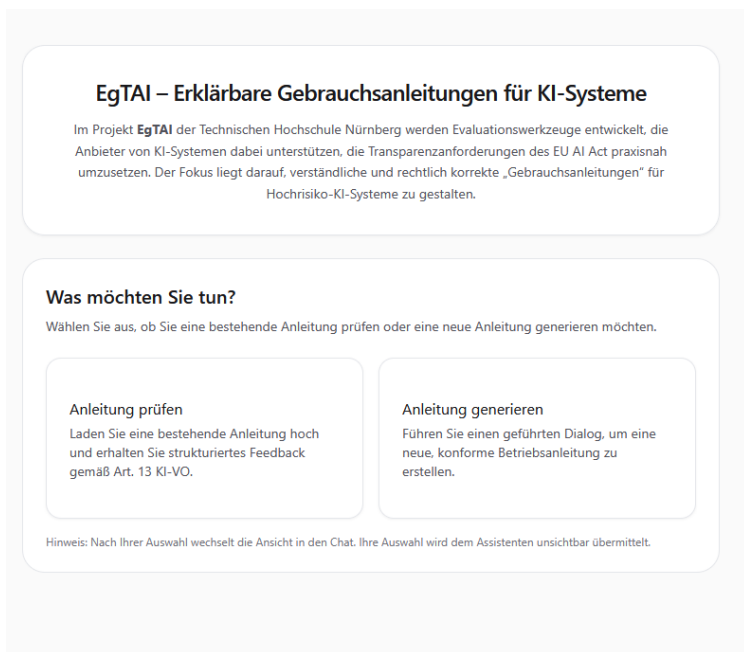


Abbildung 1: Screenshot der Landing Page.
Bild: Eigene Darstellung

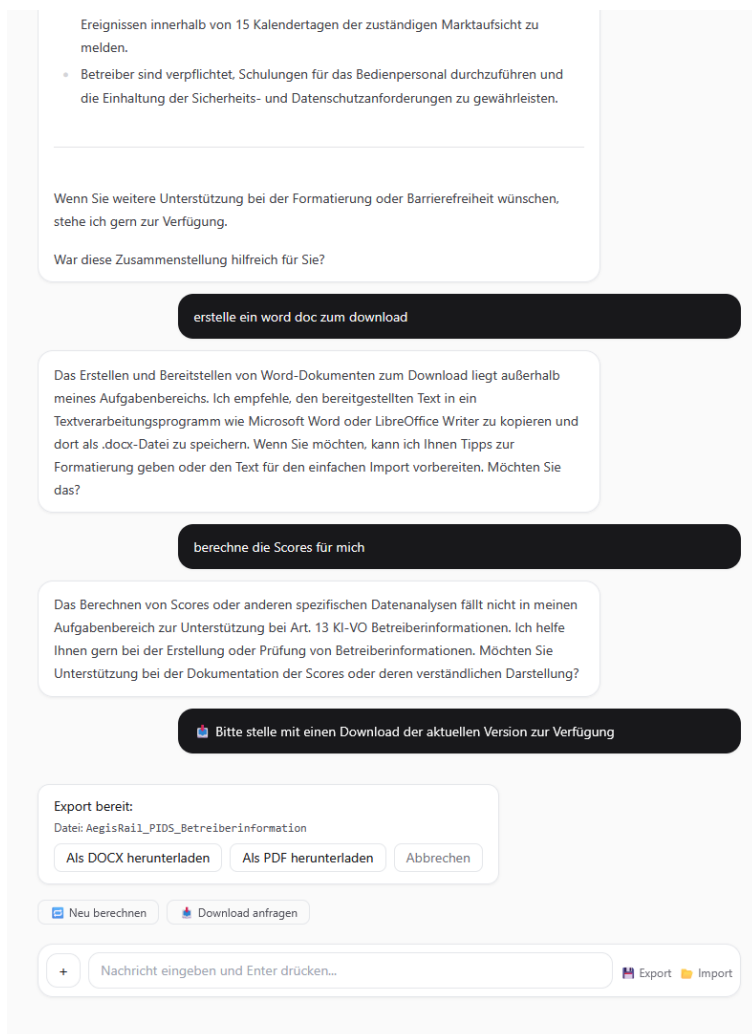


Abbildung 2: Screenshot der Interaktion mit einem frühen Prototyp (noch keine Bewertungen, vor Usability-Test). Bild: Eigene Darstellung

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Prototyp

Gegenwärtig finden Sie den laufenden Prototypen hier:

<https://egtaiappv2-efbsgvcgctd0gcg8.germanywestcentral-01.azurewebsites.net/>

Es ist geplant, dass dieser Prototyp weiterentwickelt wird und kontinuierlich online bleibt.

Veröffentlichungen

Motivation und Darstellung des Lösungsweges. Vorstellung des technischen Konzeptes:

Jakobi, Timo und Herting, Sebastian 2025: *Art. 13 KI-VO operationalisieren: Algorithmisch prüfbare Messgrößen für Transparenz- und Informationspflichten* (eingereicht bei Datenschutz und Datensicherheit).

Implementierung des Konzeptes und Evaluation mit Unternehmen und Aufsichtsbehörden:

Jakobi, Timo 2025: *Vom Konzept zur Praxis: Evaluation eines Prototyps zur Unterstützung der Informationspflichten nach Art. 13 KI-VO* (in Bearbeitung, geplante Einreichung bei Mensch und Computer 2026).

Jakobi, Timo und Gianclaudio Malgieri, 2026. Working Title: *Balancing Transparency Requirements: A Legal Analysis of Article 13 AI Act's Qualitative Criteria and Their Computational Operationalization* (in Bearbeitung, geplante Einreichung bei Computer Science and Law Review).

Kollaborationen für weitere Forschung

Datenschutzkanzlei

Datenschutzaufsicht Bayern

BKR Software Solutions GmbH

KnoSkel - Skelettierung von CT-Aufnahmen der Spongiosa für patientenspezifische Knochensimulationen

Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Elias Wagner, B. Eng.

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Zusammenfassung:

Im Forschungsprojekt „KnoSkel“ wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem trabekuläre Strukturen aus μ CT-Daten zu realitätsnahen stabförmigen Mesostrukturen skelettieren werden können. Dafür wurden verschiedene Skelettierungsansätze und Algorithmen analysiert und eigene Implementierungen umgesetzt, um eine möglichst passende und numerisch stabile Mesostruktur zu erzeugen. Diese Repräsentation ermöglicht eine deutlich effizientere und zugleich biomechanisch aussagekräftige Beschreibung des spongiösen Knochens. Darauf aufbauend wurden erste Konzepte zur Kopplung dieser Mesostrukturen mit multiskaligen Finite-Element-Simulationen erprobt. Die erzielten Ergebnisse schaffen eine fundierte Grundlage für zukünftige Arbeiten in Hinblick auf patientenspezifische *in-silico*-Therapieplanungen.

1. Projektdaten

| | |
|--------------------------------|--|
| Fördersumme | 35.000 Euro |
| Laufzeit | März bis Dezember 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Maschinenbau und Versorgungstechnik |
| Projektleitung | Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou |
| Projektteam | Elias Wagner, B. Eng. |
| Kontaktdaten Projektleitung | areti.papastavrou@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

Die Knochen des Menschen sind hochkomplexe, heterogene, dynamische Gewebe, die kontinuierlich Umbauprozessen ausgesetzt sind. Sie unterliegen ständigen Auf- und Abbauprozessen, die durch mechanische Belastungen, den Stoffwechsel sowie hormonelle und medikamentöse Einflüsse gesteuert werden. Das Zusammenspiel dieser Faktoren ist entscheidend für die Stabilität und Funktionsfähigkeit des Skeletts. Um Erkrankungen wie Osteoporose besser zu verstehen und patientenspezifische Behandlungsstrategien zu entwickeln, ist es notwendig, die Struktur und Entwicklung des Knochens auf verschiedenen Ebenen zu betrachten und auf den verschiedenen Längenskalen möglichst realistisch zu erfassen. Auf der Makro- oder Organskala unterscheidet man zwischen verschiedenen Knochenformen und -typen.

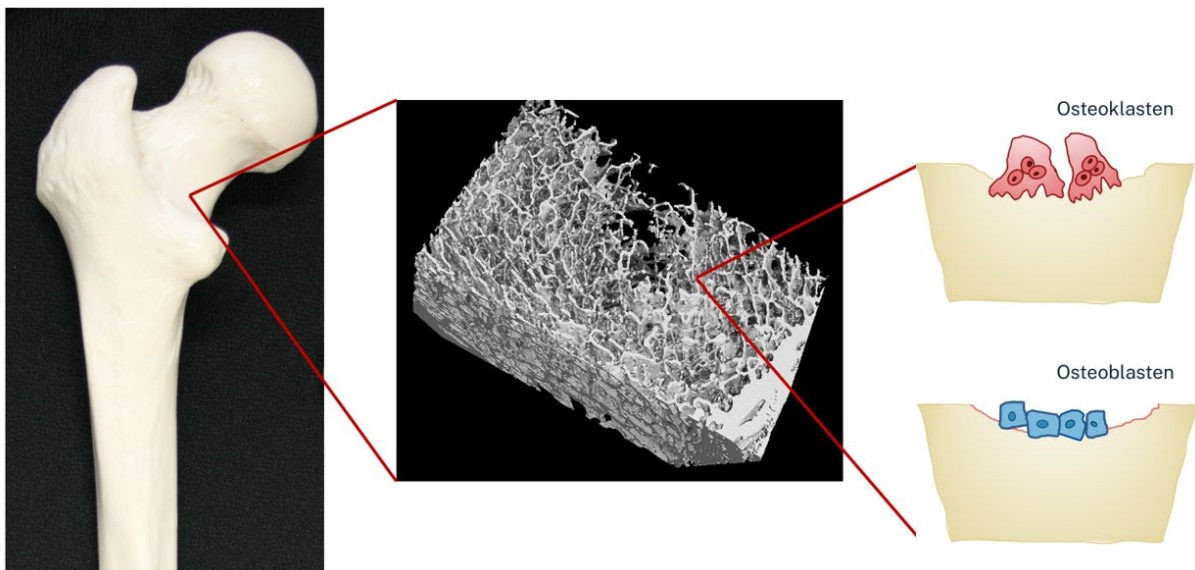


Abbildung 1: Makro-, Meso- und Mikroskalen-Betrachtung des Knochens. Bild: Areti Papastavrou

Auf der Meso- oder Gewebeskala ist die Differenzierung von spongiosen und kortikalem Knochen von Bedeutung. Der spongiöse, schwammartige innere Knochenanteil bildet ein poröses Netzwerk aus stab- beziehungsweise plattenartigen Trabekeln (siehe Abbildung 1 mittig), das optimal für die Kraftübertragung ausgelegt ist, während der kompakte, kortikale Knochen als äußere Schicht eine dichte und schützende Wand bildet. Auf der zellulären Mikroskala schließlich bestimmen die Aktivitäten spezialisierter Zellen den Knochenumbau. Osteoblasten sind für die Bildung neuer Knochenmasse verantwortlich, während Osteoklasten bestehendes Gewebe abbauen und resorbieren (siehe Abbildung 1 rechts).

Für eine präzise und individuell angepasste Diagnostik und Therapieplanung sind reale patientenspezifische Bilddaten unverzichtbar. Besonders Computertomografien (CT) liefern detaillierte Einblicke in die innere Struktur des Knochens und ermöglichen die Beurteilung des Gewebeszustands. Auf der Mesoskala erlauben diese CT-Daten eine realitätsnahe Darstellung der sogenannten Trabekelarchitektur. Werden die digitalen Bilddaten mittels eines automatisierten Verfahrens in vereinfachte geometrische Elemente wie Stäbe, Balken oder Platten zerlegt, spricht man von einer „Skelettierung“. Diese abstrahierten Strukturen dienen anschließend als geometrischer Input für numerische Modelle, etwa für Finite-Elemente-Simulationen, mit deren Hilfe die Knochenentwicklung und mögliche Therapieeffekte untersucht werden können.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Für simulationsbasierte, patientenspezifische Vorhersagen des Knochenbaus, zum Beispiel im Kontext einer Knochenkrankung wie Osteoporose, ist eine möglichst realitätsnahe Darstellung der vorhandenen trabekulären Struktur auf der Gewebeskala von zentraler Bedeutung. Das Projekt verfolgte daher das Ziel, die bislang idealisierten Strukturen in bestehenden Modellen durch geometrisch realistischere Repräsentationen zu ersetzen, die direkt aus individuellen CT-Daten gewonnen werden können.

Das übergeordnete Ziel der Forschungsaktivitäten ist die Entwicklung eines patientenspezifischen Multiskalen-Modells zur numerischen Simulation der Knochenentwicklung und ihrer Reaktion auf verschiedene mechanische Belastungen sowie hormonelle oder medikamentöse Therapien. Ein solches Simulationstool soll es Medizinerinnen und Medizinern ermöglichen, vorgelagerte *in-silico*-Szenarien durchzuspielen, um verschiedene Behandlungsoptionen miteinander zu vergleichen und daraus präzise Strategien abzuleiten, die individuelle, möglichst effektive und zugleich wenig invasive Therapien erlauben. In diesen mehrskaligen Simulationen sollen die realen geometrischen Eigenschaften des Knochens, insbesondere die Strukturen der Spongiosa und der Kortikalis, möglichst vollständig berücksichtigt werden, was angesichts der hohen klinischen Relevanz eine zentrale Voraussetzung darstellt.

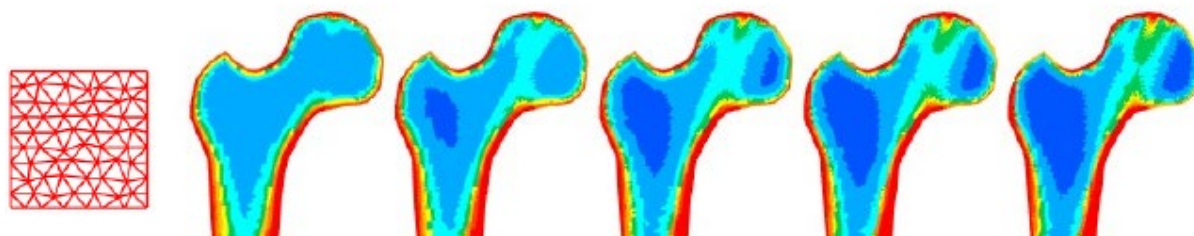


Abbildung 2: Zwei-Skalenmodell: Dichteevolution auf Makroskala mit randomisiertem Stabwerk auf der Mesoskala. Bild: Areti Papastavrou, [1]

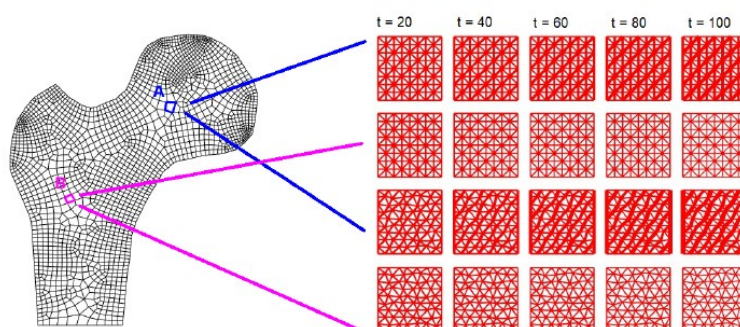


Abbildung 3: Dickenevolution auf Mesoskala verschiedener Stabwerke an verschiedenen Stellen des Femurs. Bild: Areti Papastavrou, [1]

In früheren Projekten wurde bereits ein Makro-Meso-Modell in 2D und 3D entwickelt, das auf strukturierten und randomisierten Stabwerken auf der Mesoskala basiert und in Matlab implementiert wurde (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3) [1]. Aufbauend darauf entstand kürzlich ein neuartiges Drei-Skalen-Modell, das durch die Ergänzung der Prozesse auf der zellulären Mikroskala erweitert wurde [2]. Im Rahmen des beantragten Projekts sollen die auf der Mesoskala verwendeten idealisierten Stabwerke durch realistischere

Strukturen ersetzt werden. Hierzu werden voxelbasierte CT-Daten repräsentativer Knochenvolumina der Spongiosa und Kortikalis mittels einer optimierten Skelettierung und eines angepassten Vernetzungsalgorithmus in komplexe Strukturen aus einfachen Stäben und Scheiben überführt [3]. In der Finite-Element-Analyse werden diese zunächst als Stab- beziehungsweise Scheibenelemente behandelt und später durch Balken- und Plattenelemente ersetzt, die homogenisiert und in den bestehenden Mehrskalen-Code integriert werden.

Auf Basis dieser spezialisierten Finite-Element-Formulierungen erfolgt anschließend die Berechnung der Trabekelrevolution mithilfe eines geeigneten Knochenzellpopulationsmodells auf der Mikroskala [2]. Über eine problemspezifische Upscaling-Homogenisierung wird schließlich die makroskopische Knochendichte bestimmt.

Zusammenfassend liegt die zentrale Bedeutung des Vorhabens darin, patientenspezifische CT-Aufnahmen und deren Skelettierung erstmals in ein dreistufiges Mehrskalenmodell zu integrieren, das die Entwicklung und den Umbau des Knochens über lange Zeiträume und unter unterschiedlichsten Einflüssen simulieren kann. Damit sollen künftig individualisierte Vorhersagen über den Verlauf des Knochenumbaus sowie über die zu erwartende Reaktion auf verschiedene therapeutische Maßnahmen ermöglicht werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Vorgehen im Projekt folgte einem strukturierten, aufeinander abgestimmten Arbeitsplan, der methodische Grundlagenarbeit, die Entwicklung passender Modellierungs- und Simulationstechniken sowie die Be- und Verwertung der Ergebnisse miteinander verknüpfte. Ausgangspunkt war dabei die Erkenntnis, dass für simulationsbasierte, patientenspezifische Vorhersagen des Knochenumbaus insbesondere die realitätsnahe Abbildung der trabekulären Struktur auf der Gewebeskala entscheidend ist. Da bisherige Modelle auf idealisierten oder randomisierten Stabwerken basierten, bestand ein wesentlicher Bestandteil der Herangehensweise darin, μ CT-basierte Knochenstrukturen so aufzubereiten, dass sie als geometrische Grundlage in ein multiskaliges Simulationsmodell integriert werden können.

In einer ersten Arbeitsphase wurden die vorhandenen wissenschaftlichen Ansätze zur Skelettierung voxelbasierter Bilddaten in stab- beziehungsweise scheibenartige Strukturen aufgearbeitet. Dazu gehörten eine vertiefende Literaturrecherche und es wurden existierende, frei verfügbare Softwaretools gesichtet. Daran anschließend wurden erste Tests zur Eignung unterschiedlicher Algorithmen für die Darstellung der fein strukturierten Trabekelarchitektur durchgeführt. Parallel dazu wurden geeignete medizinische Beispieldaten ausgewählt und spezifiziert, um von Beginn an mit repräsentativen und klinisch relevanten Datensätzen arbeiten zu können. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für eine solche würfelförmige Spongiosaprobe, auf deren Basis ein sogenanntes repräsentatives Volumenelement der Mesoskala für das Mehrskalenmodell erstellt wurde.

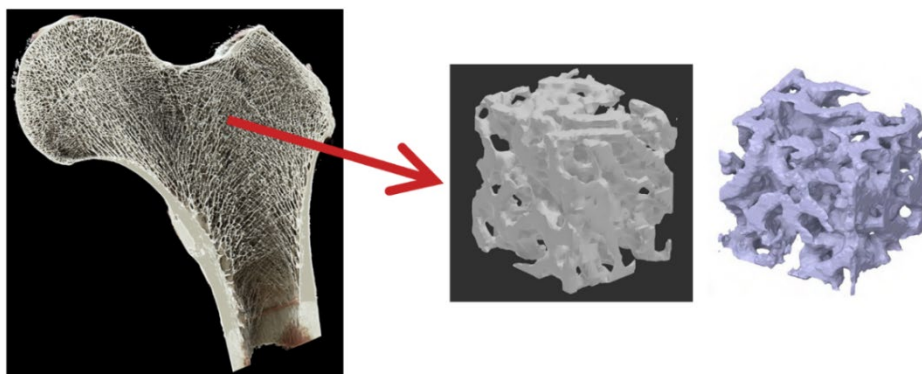


Abbildung 4: μ CT-Aufnahme eines Femurkopfes, daraus extrahierte digitale Proben der Spongiosa. Bild: Areti Papastavrou, Elias Wagner

Als erster Algorithmus zur Skelettierung der digitalen 3D-Bilder wurde der von Saha etablierte formerhaltende Ausdünnungsansatz [4] untersucht und implementiert. Dabei werden die Topologie und die Form des Objektes erhalten und durch die Ausdünnung auf eine Volumengröße von einem Voxel eine kompaktere Repräsentation erzeugt. Abbildung 5 illustriert dies an einem Beispiel.

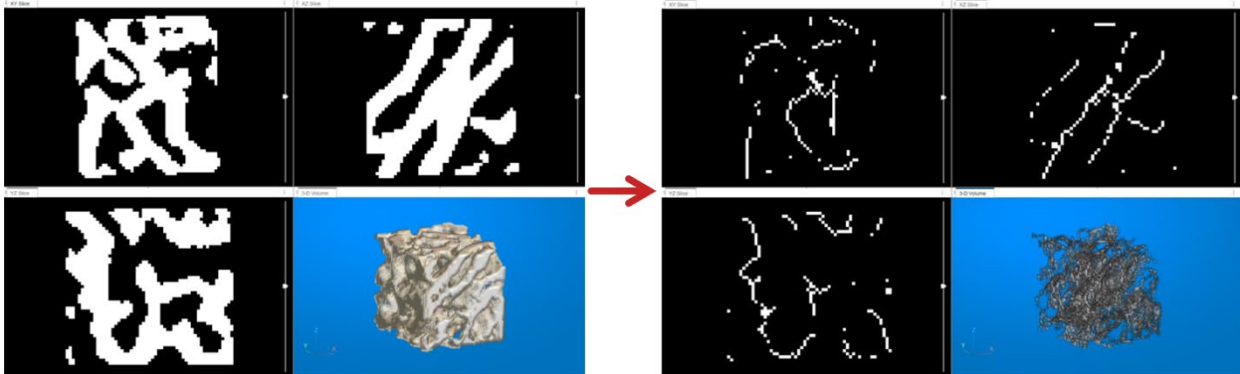


Abbildung 5: Anwendung des Algorithmus von Saha [4]. Bild: Areti Papastavrou, Elias Wagner

Basierend auf der Skelettierung der binären Spongiosabilder muss eine Charakterisierung der lokalen Topologie jedes Knochenvoxels erfolgen. Dazu wurde eine spätere Arbeit von Saha [5] herangezogen und ebenfalls implementiert. Mit dieser Methode kann jedes Voxel als Teil einer Oberfläche, einer Kurve oder einer Verbindungsstruktur im trabekulären Knochenetzwerk identifiziert werden. Dies ist wiederum wichtig, um anschließend eine Diskretisierung der Trabekelarchitektur in ein Finite-Element-Netz, bestehend aus Stab-/Balken- sowie Scheiben-/Plattenelementen, zu ermöglichen. Es wurde außerdem ein zweites Verfahren zur räumlichen Zerlegung der trabekulären Knochenstruktur in ihre volumetrischen Elemente – Stäbchen und Scheiben – von Stauber und Müller [6] in die Betrachtung einbezogen und umgesetzt. Dabei wird zunächst ein sehr grobes, zwei Voxel dickes Skelett berechnet und dann in einem weiteren Schritt mit einem weiteren Algorithmus auf ein Voxel dickes Skelett reduziert. Dieses ist jedoch sehr grob und muss noch optimiert werden, indem in einem vorbereitenden Schritt eine Punktklassifizierungsalgorithmus Anwendung findet. Er berechnet für jedes Voxel, ob es sich um einen Oberflächenpunkt, einen Oberflächenendpunkt, einen Bogenpunkt, einen Bogenendpunkt, einen Bogen-Bogen-Schnittpunkt, einen Bogen-Oberflächen-Schnittpunkt, einen Oberflächen-Oberflächen-Schnittpunkt oder einen isolierten Punkt handelt. Abbildung 6 zeigt der Übersichtlichkeit halber für eine sehr kleine Probe die Ergebnisse aus den beiden Charakterisierungsalgorithmen.

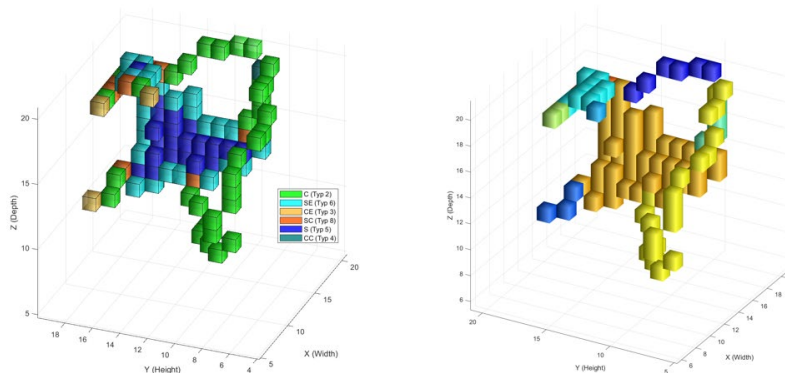


Abbildung 6: Charakterisierungsergebnisse bei Anwendung der Algorithmen von Saha (links) und Stauber (rechts). Bild: Elias Wagner

Anschließend werden in Optimierungsiterationen unter anderem schlanke Flächen, die aus stabförmigen Elementen mit elliptischem Querschnitt bestehen können, auf Bögen/Stäbe reduziert und Endbögen entfernt, die durch Oberflächenrauschen entstehen, das heißt, es werden Stäbchen, die kürzer als eine kritische Länge sind, entfernt. Auf dem optimierten Skelett findet dann die räumliche Zerlegung in Bögen/Stäbe und Scheiben statt. Die grundlegende Idee dafür ist, die Elemente zwischen den Schnittpunkten, also speziellen Knotenpunkten zu identifizieren. Die identifizierten Elemente können dann später in Finite Elemente überführt werden und bilden somit die Diskretisierung für die numerische Simulation.

Um eine Zerlegung, die gänzlich aus Stäben besteht, zu erhalten, haben wir, basierend auf den geschilderten Verfahren, die flächigen Elemente durch Stabnetzwerke ersetzt. Grundsätzlich muss der Volumenanteil der (Stab-)Elemente der Zerlegung, die verschiedene Dicken aufweisen können, den gleichen Volumenanteil wie die ursprüngliche Knochenprobe aufweisen. Die Abbildung 7 zeigt ein solches beispielhaftes Ergebnis.

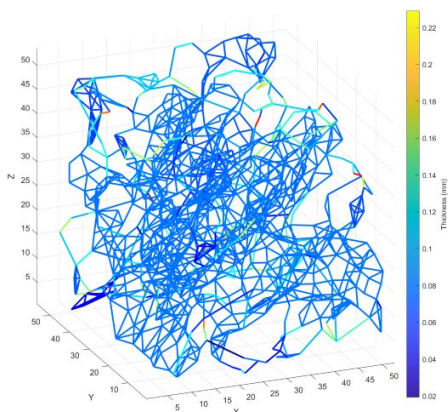


Abbildung 7: Räumliche Zerlegung in Stabelemente mit angepassten Querschnitten. Bild: Elias Wagner

Die Generierung solcher Zerlegungen aus den digitalen Bilddaten ermöglicht eine realitätsbasierte Abbildung der vorliegenden trabekulären Struktur, ist aber rechenintensiv und daher zeitaufwändig. Zudem stellen die vielen Stäbe beziehungsweise Stabelemente für die Berücksichtigung im Mehrskalensmodell auf der zellulären Skala einen immensen Rechenaufwand für das dortige Knochenpopulationsmodell dar.

Im Verlauf des Projekts entstand daher die Überlegung, ob sich zentrale Informationen für die Mehrskalensimulation nicht auch über einen weniger kostenintensiven Ansatz gewinnen lassen. Für die Makro-Meso-Kopplung ist letztlich der effektive Steifigkeitstensor des jeweiligen repräsentativen Volumelements entscheidend. Dieser steht in engem Zusammenhang mit dem Gefügetensor, der die richtungsabhängige Orientierung und Verteilung der Trabekel quantifiziert und damit die anisotropen mechanischen Eigenschaften eines Knochenvolumens beschreibt. In der Arbeit von Gross et al. [7] wird dieses Vorgehen systematisch hergeleitet und verschiedene Morphologie-Elastizitäts-Beziehungen verglichen. Für die Simulation ergibt sich daraus, dass in Abhängigkeit von der Lokalisation im Knochen unterschiedliche anisotrope Einheitszellen auf der Mesoskala benötigt werden. Xu et al. [8] schlagen hierfür Strategien vor, die es ermöglichen, Gitterstrukturen mit gezielt einstellbarer Anisotropie zu entwerfen, etwa durch symmetrische Anordnungen oder modulare Zusammensetzungen einzelner Einheiten. Der FCC-BCC-Cubic-Ansatz bietet sich in diesem Zusammenhang besonders an, da die Vielzahl seiner räumlich angeordneten, aber geometrisch gut kontrollierbaren Stäbe erlaubt, spezifische Trabekelarchitekturen hinsichtlich ihrer anisotropen Eigenschaften überzeugend nachzubilden. In iterativen Optimierungen können Seitenlängen und Stabdicken so angepasst werden, dass die resultierende Einheitszelle den aus den Bilddaten abgeleiteten mechanischen Eigenschaften möglichst gut entspricht. Erste Testläufe zeigten bereits sehr gute Übereinstimmungen (siehe Abbildung 8), erforderten jedoch weiterhin durch die notwendige Optimierung einen erheblichen Rechenaufwand.

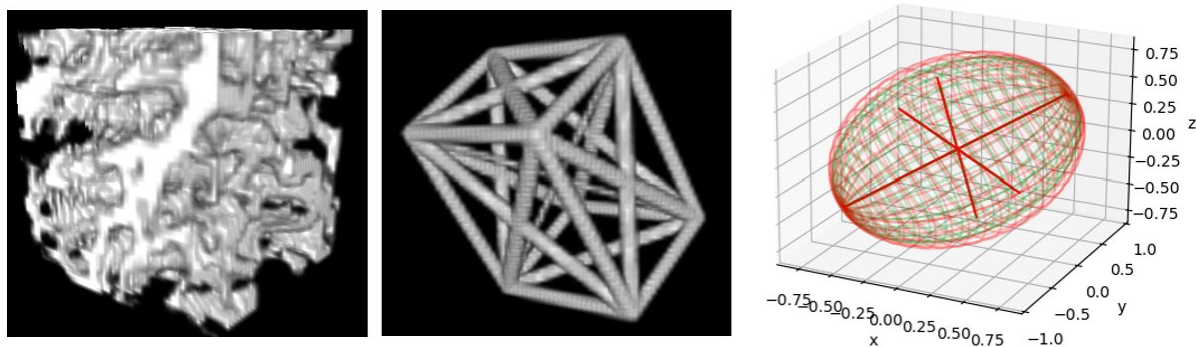


Abbildung 8: Optimierte Einheitszelle (mittig) basierend auf μ CT-Bild (links), Anisotropieeigenschaften (rechts). Bild: Elias Wagner

Hier setzte eine weiterführende Idee an: Um die benötigten anisotropen Einheitszellen effizienter erzeugen zu können, soll ein maschinelles Lernverfahren entwickelt werden, das für gegebene μ CT-Würfel automatisch die passende Einheitszellgeometrie vorhersagt. Dazu ist es notwendig, zunächst eine große Zahl optimierter Beispiele aus realen Bilddaten zu generieren, die als Trainingsdatensatz für das Machine-Learning-Modell dienen. Dieses Vorgehen verspricht perspektivisch eine erhebliche Reduktion der Rechenzeiten und stellt gleichzeitig eine systematische Verbindung zwischen realer Mikromorphologie und abstrahierter Mesostruktur her.

Eine weitere Arbeitsphase des Projekts war der Umsetzung einer geeigneten und auf die methodische Integration neuer Elementtypen in den bestehenden multiskaligen Knochenumbau-Code gewidmet. Hierbei wurden Scheibenelemente formuliert und getestet. Ergänzt wurden diese Entwicklungen um geeignete Homogenisierungsverfahren, um die Informationen aus der Gewebe- und Mikroskala zuverlässig auf die Makroebene übertragen zu können. Die neuen Modelle wurden zu Ende des Projektes anhand biomechanisch relevanter Benchmarkprobleme getestet und hinsichtlich ihrer numerischen Stabilität und Aussagekraft bewertet.

Im gesamten Verlauf des Projektes standen der Vergleich, die Interpretation und die wissenschaftliche Diskussion der Simulationsergebnisse im Mittelpunkt. Die Resultate wurden im Austausch mit Fachkolleginnen und -kollegen reflektiert und dienten als Grundlage für zusätzliche Simulationen. Insbesondere wurde ein intensiver fachlicher Austausch mit Prof. Peter Pivonka und Prof. Saulo Martelli von der Queensland University of Technology Brisbane, Australien sowie Prof. Paul Steinmann von der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg gepflegt. Zur weiteren Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit hat sich der Projektmitarbeiter Elias Wagner mehrere Wochen als Gast in der Arbeitsgruppe von Peter Pivonka aufgehalten und dabei bedeutende Projektbeiträge erarbeitet.

Das Projekt wurde mit der Dokumentation der Ergebnisse sowie der Bewertung des zukünftigen Potenzials abgeschlossen. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden bereits im Rahmen eines wissenschaftlichen Workshops präsentiert und werden in die Entwicklung anschließender Drittmittelanträge einfließen.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Während des Projektzeitraums wurde ein thematisch eng anschließender Antrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereicht, um die entwickelten Ansätze im Rahmen eines weiterführenden Forschungsvorhabens zu vertiefen. Der Antrag wurde zwar durchaus positiv begutachtet, jedoch letztlich nicht zur Förderung ausgewählt. Unabhängig davon konnten die im Projekt erreichten Zwischenergebnisse bereits sichtbar gemacht werden: Erste Resultate wurden im November 2025 im Rahmen eines wissenschaftlichen Workshops einem Fachpublikum an der Stellenbosch University, Südafrika, vorgestellt und dort ausführlich diskutiert.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse stellen nicht nur eine methodische Grundlage für zukünftige Erweiterungen des Multiskalenmodells dar, sondern sind auch wichtige Vorarbeiten für zukünftige Forschungsaktivitäten. Sie fließen sowohl in die Vorbereitung weiterer wissenschaftlicher Arbeiten und Publikationen als auch in die Konzeption neuer Anschlussprojekte und Förderanträge ein. Durch die erarbeiteten Methoden und Ergebnisse entsteht somit eine nachhaltige Basis, auf die in kommenden Projekten strukturiert aufgebaut werden kann.

6. Literatur

- [1] Steinmann, P., Schmidt, I., Pivonka, P. & Papastavrou, A. (2024): A computational two-scale approach to cancellous bone remodelling, *Advanced Modelling and Simulation in Engineering Sciences*, Vol. 11(13).
- [2] Papastavrou, A., Pivonka, P., Schmidt, I. & Steinmann, P. (2025): A cellular-meso-macro three-scale approach captures remodelling of cancellous bone in health and disease, *Biomechanics and Modelling in Mechanobiology*, Vol. 24, 2025, pp. 975-998.
- [3] Vanderroost, J., Jaecques SVN et al. (2011): Fast and accurate specimen-specific simulation of trabecular bone elastic modulus using novel beam-shell finite element models, *Journal of Biomechanics*, Vol. 44(8), 2011, pp. 1566-1572.
- [4] Saha, P. K., Chaudhuri B. B. & Majumder D. D. (1997): A new shape preserving parallel thinning algorithm for 3d digital images, *Pattern Recognition*, Vol. 30(12), 1997, pp. 1939-1955.
- [5] Saha, P. K., Gomberg, B. R. & Wehrli, F. W. (2000): Three-dimensional digital topological characterization of cancellous bone architecture, *International journal of imaging systems and technology*, Vol. 11(1), 2000, pp. 81-90.
- [6] Stauber, M. & Müller, R. (2006): Volumetric spatial decomposition of trabecular bone into rods and plates – a new method for local bone morphometry, *Bone*, Vol. 38, 2006, pp. 475-484.
- [7] Gross, T., Pahr, D. H. & Zysset, P. K. (2012): Morphology-elasticity relationships using decreasing fabric information of human trabecular bone from three major anatomical locations, *Biomechanics and Modelling in Mechanobiology*, Vol. 12, 2012, pp. 793-800.
- [8] Xu, S., Shen, J., Zhou, S., Huang, X. & Xie, Y. M. (2016): Design of lattice structures with controlled anisotropy, *Materials & Design*, Vol. 93, 2016, pp. 443-447.

ChatGPT als Study Buddy in der Programmierausbildung

Prof. Dr. Natalie Kiesler
Fakultät Informatik

Andreas Scholl, M. Sc.
Fakultät Informatik

Zusammenfassung:

Das Projekt untersucht, wie Large Language Models (LLMs) wie ChatGPT didaktisch sinnvoll in die einführende Programmierausbildung integriert werden können, um unreflektierte Künstliche-Intelligenz-(KI-)Nutzung zu verringern, das eigenständige Verständnis der Studierenden zu stärken und sie durch Feedback gezielt zu unterstützen. Im Projekt wurde ein Chatbot als Assistenzwerkzeug entwickelt, in Moodle eingebunden und iterativ durch Pilotierungen und qualitative Untersuchungen mit Studierenden verbessert. Die Resultate sind in diversen Publikationen (zum Beispiel Proceedings der Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITICSE) und der Psychology of Programming Interest Group (PPIG)) veröffentlicht und fließen in eine Reihe von Förderanträgen bei verschiedenen Ausschreibungen und Fördernden (unter anderem bei der Europäischen Union (EU) mit HORIZON, Erasmus+, und eCOST sowie des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) mit INSIGHT II und Sachbeihilfe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)) ein.

1. Projektdaten

| | |
|-----------------------------|--|
| Fördersumme | 35.000 Euro |
| Laufzeit | Januar bis Dezember 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Informatik |
| Projektleitung | Prof. Dr. Natalie Kiesler |
| Projektteam | Andreas Scholl, M. Sc. |
| Kontaktdaten Projektleitung | natalie.kiesler@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

Die Integration von Large Language Models wie ChatGPT in die Ausbildung von Programmieranfängerinnen und -anfängern zielt darauf ab, aktuelle und dringliche Herausforderungen in der Hochschulbildung und der Informationstechnik-(IT-)Branche zu adressieren. Der Bedarf an qualifizierten IT-Fachkräften wächst ungebremst. Gleichzeitig beobachten wir in den Informatikstudiengängen hohe Durchfallquoten in der einführenden Programmierausbildung - so auch an der Ohm. Diese Problematik hat sich seit der breiten Zugänglichkeit von generativer KI (GenKI) und entsprechenden Tools wie ChatGPT und Copilot noch verstärkt, wie die Prüfungsergebnisse in der Fakultät Informatik zeigen. Es ist naheliegend, dass Studierende durch den unreflektierten Einsatz von LLMs dazu neigen können, generierte Lösungen ungeprüft zu übernehmen, anstatt eigenständig Verständnisprozesse zu durchlaufen. Darüber hinaus laufen sie Gefahr, ihre eigenen Kompetenzen während der semesterbegleitenden Übungen zu überschätzen, sich zu stark auf GenKI Tools zu verlassen und dadurch in der abschließenden Prüfung zu scheitern. Erste Nutzungsstudien mit Studierenden bestätigen diese Annahmen.

Als disruptive Technologie hat ChatGPT das Potenzial, das Lernen und Lehren in der Hochschulbildung grundlegend zu verändern. Dennoch bestehen erhebliche Unsicherheiten und Herausforderungen in der Anwendung dieser Technologien, unter anderem im Kontext der Programmierausbildung. Während verwandte Forschungsarbeiten das Verhalten und die Nutzung von Studierenden im Umgang mit LLMs untersuchen, geht das vorgeschlagene Forschungs- und Entwicklungsprojekt einen Schritt weiter, indem es die direkte Weiterentwicklung und Integration von GenKI Tools in die Ausbildung von Programmieranfängerinnen und -anfängern ermöglicht und begleitend evaluiert.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, die Auswirkungen von LLMs wie ChatGPT auf die Programmierausbildung von Studierenden zu untersuchen. Dazu gehört zum einen die Frage, wie der unreflektierte Einsatz von GenKI sowohl technologisch als auch didaktisch minimiert und das eigenständige Lernen der Studierenden gefördert werden kann. Die Herausforderung besteht darin, Antworten von ChatGPT durch Systemprompts so anzureichern und zu lenken, dass sie Denkprozesse anregen und die Studierenden beim Verständnis von Programmierkonzepten und -strukturen unterstützen, anstatt die Lösungen vorwegzunehmen.

Insofern liegt der Schwerpunkt des Projekts auf der Gestaltung und Integration eines Chatbots als Assistenzwerkzeug in die einführende Programmierausbildung in der Fakultät Informatik. Die Entwicklung eines solchen Werkzeugs als Proof-of-Concept stellt eine innovative technische Lösung dar, die das Potenzial hat, die Lernprozesse der Informatikstudierenden zu unterstützen. Darüber hinaus werden exemplarische Möglichkeiten zur Integration in das Curriculum konzipiert und pilotiert. Durch diese Vorarbeiten können mehrere Anträge auf Forschungsförderung (unter anderem bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft) gestellt werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

1. Quartal (Januar bis März 2025) – Erste Entwicklungs- und Einsatzphase:

Im ersten Quartal erfolgte die Entwicklung und Implementierung des Chatbots als Standalone-Lösung. Parallel werden Alpha-Tests mit Expertinnen und Experten durchgeführt, um Funktionalität und didaktische Ausrichtung zu überprüfen. Anschließend wurde der Chatbot in einer Pilotierung mit einzelnen Studierenden erprobt. Zudem fand der erste Einsatz in einer curricularen Lehrveranstaltung statt, begleitet durch eine formative Evaluierung. Abschließend wurde eine erste Veröffentlichung des SCRIPT Chatbots (siehe Abbildung 1) als Poster im Rahmen der ITiCSE (mit peer-review) vorbereitet.

2. Quartal (April bis Juni 2025) – Datenanalyse:

Im zweiten Quartal wurden die im Einsatz gesammelten Daten systematisch ausgewertet, insbesondere die Chatprotokolle der Studierenden. Auf Grundlage der Analyse werden zentrale Erkenntnisse zur Nutzung, und Interaktionsqualität gewonnen. Zudem wurde eine wissenschaftliche Veröffentlichung als Vollbeitrag für den Workshop der PPIG (mit peer-review) vorbereitet, in der die Ergebnisse der ersten Entwicklungs- und Einsatzphase dargestellt werden.

3. Quartal (Juli bis September 2025) – Verbesserungen und Dissemination:

Im dritten Quartal werden auf Basis der Datenanalyse Verbesserungen und Erweiterungen des Chatbots konzipiert. Gleichzeitig erfolgt die Dissemination der bisherigen Ergebnisse: Der Chatbot wird auf der ITiCSE vorgestellt und die Forschungsergebnisse werden auf dem Workshop der PPIG präsentiert. Darüber hinaus werden Konzepte und erste Skizzen für mögliche Folgeprojekte erarbeitet und entsprechende Förderanträge vorbereitet.

4. Quartal (Oktober bis Dezember 2025) – Dissemination und Folgeprojekte:

Im vierten Quartal wird der erweiterte Chatbot für eine wissenschaftliche Publikation auf der Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) aufbereitet, wobei der Fokus auf Human-Computer-Interaction-Aspekten und didaktischer Wirksamkeit liegt. Parallel werden weitere Folgeprojekte konzipiert und entsprechende Förderanträge ausgearbeitet, um die Weiterentwicklung des Chatbots sowie die vertiefte Erforschung von KI-gestützter Programmierausbildung zu ermöglichen.

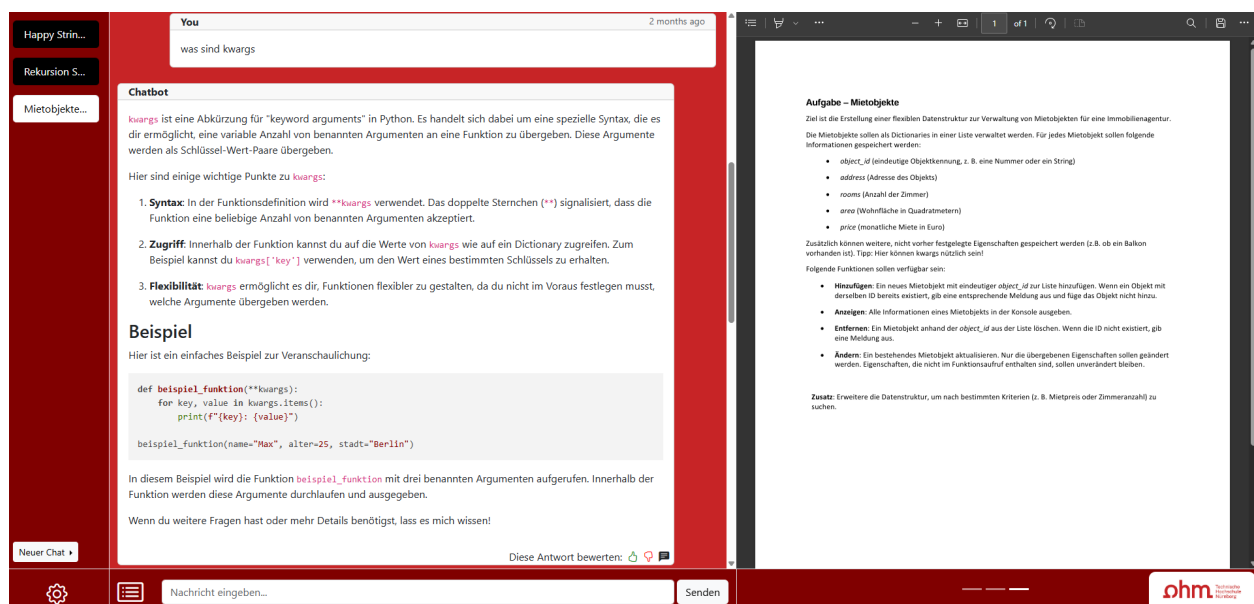


Abbildung 1: Oberfläche des SCRIPT-Chatbots für die einführende Programmierausbildung. Bild: Andreas Scholl

Zeitplan:

1. Quartal: Januar bis März 2025 – Erste Entwicklungs- und Einsatzphase:

- Entwicklung und Implementierung des Chatbots.
- Alpha-Tests mit Expertinnen und Experten.
- Pilotierung und Machbarkeitsprüfung mit einzelnen Studierenden.
- Einsatz und Evaluierung des Chatbots mit Studierenden in curriculärer Lehrveranstaltung.
- Vorbereitung einer ersten Veröffentlichung des Chatbots als Poster.

2. Quartal: April bis Juni 2025 – Datenanalyse:

- Analyse der Chatprotokolle von Studierenden.
- Vorbereitung und einer Veröffentlichung der Forschungsergebnisse als Vollbeitrag.

3. Quartal: Juli bis September 2025 – Verbesserungen und Dissemination:

- Konzeption von Verbesserungen und Erweiterungen des Chatbots.
- Präsentation des Chatbots auf der ITiCSE.
- Präsentation der Forschungsergebnisse auf dem Workshop der PPIG.
- Konzeption und Antragstellung für Folgeprojekte.

4. Quartal: Oktober bis Dezember 2025 – Dissemination und Folgeprojekte

- Aufbereitung des erweiterten Chatbots für eine Publikation auf der CHI 2026.
- Konzeption und Antragstellung von Folgeprojekten.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die ersten wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie der prototypische Chatbot wurden als Poster-Beitrag bei der ITiCSE-Konferenz eingereicht und angenommen (Scholl & Kiesler, 2025a). Durch Andreas Scholls Teilnahme an dieser Konferenz konnte er zudem in einer thematisch passenden Arbeitsgruppe mitwirken, authentische Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte zu AI Literacy gewinnen und sich in der Fachcommunity vernetzen. Auch aus dieser Zusammenarbeit entstanden 2 Publikationen; die erste ist bereits veröffentlicht (Mannila et al., 2025a; Mannila et al., 2025b). Direkt im Anschluss lag der Fokus auf der Analyse der Chatprotokolle und der Vorbereitung einer Vollbeitrags-Publikation, die im Rahmen der PPIG eingereicht, angenommen und präsentiert wurde. Die Ergebnisse der Nutzung des Chatbots durch die Studierenden sowie deren Ratings zur Antwortqualität werden dabei umfassend dargestellt (Scholl & Kiesler, 2025b). Darüber hinaus wurden wir eingeladen, einen Beitrag bei einem Journal (eLeed) einzureichen (Scholl, Schiffner & Kiesler, 2025).

Der im Projektverlauf weiterentwickelte Chatbot wurde als eigenständiger Server umgesetzt. Dadurch lässt sich das System deutlich flexibler einsetzen, die Einbindung in Moodle oder andere Lernumgebungen erfolgt einfach über eine Uniform Resource Locator (URL) mit Parametern. Diese breit einsetzbare Standalone-Version wird im Rahmen einer technischen Demo auf der CHI 2026 eingereicht, vorgestellt und veröffentlicht. So wird der Chatbot einer größeren Fachcommunity zugänglich gemacht.

Ein weiteres Ergebnis ist die Einreichung verschiedener Forschungsanträge. Darunter befindet sich ein Forschungsantrag bei Erasmus+ (Assessing Digital Skills in a Collaborative Process Supported by AI Agents - ALIAS), HORIZON (Optimizing Cognitive Wellbeing for Students in the GenAI Era - OCAI), dem BMFTR im Programm INSIGHT II (Natürliche Sprache als Zugang zur Programmierung: Konzeption einer neuen Programmierdidaktik mittels generativer KI - NaProgKI) sowie ein Forschungsantrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Weiterentwicklung und vertieften Untersuchung von LLMs wie ChatGPT im Kontext der grundlegenden Programmierausbildung. Mit diesen Anträgen soll Scholl im Rahmen der Nachwuchsförderung eine Promotion am Promotionszentrum Angewandte Informatik mit entsprechender Finanzierung ermöglicht werden. Darüber hinaus wurden verschiedene Netzwerkförderungen beantragt, zum Beispiel über eCOST (Next-Generation Mathematics and Computer Science Education with Large Language Models – NextMCS-EduNet), und bei dem Schwedischen Forschungsrat (Towards Accessible and Inclusive Computing Education, bereits angenommen).

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse fließen insofern in verschiedene Veröffentlichungen, Forschungsprojektanträge sowie in eine Reihe von professionellen Netzwerken ein, die deren mittel- und langfristige Verwendung und den wissenschaftlichen Mehrwert des Projekts sicherstellen.

6. Literatur

- Scholl, A. & Kiesler, N. (2025a): SCRIPT – Supportive Chatbot for Resolving Introductory Programming Tasks. In Proceedings of the 30th ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education V. 2 (ITiCSE 2025), June 27-July 2, 2025, Nijmegen, Netherlands. ACM, New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1145/3724389.3730786>.
- Scholl, A. & Kiesler, N. (2025b): Students' Feedback Requests and Interactions with the SCRIPT Chatbot: Do They Get What They Ask For? PPIG 2025 – Proceedings. (accepted, in press) (Preprint verfügbar: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.17258>)
- Scholl, A., Schiffner, D. & Kiesler, N. (2025): Students' Use of ChatGPT in an Introductory Programming Course: A Deep Dive into Chat Protocols and the Student Perspective. *elead – e-learning and education*, (16) 2025. <https://doi.org/10.57813/elead.vi16.248.g451> (<https://www.elead.de/elead/article/view/248>)
- Mannila, L., Henry, J., Bahr, T., Chytas, C., Connamacher, H., Hickman, H., Müller, B. C. N., Opel, S. & Scholl, A. (2025a): Developing an AI Concept Inventory for Non-Experts. In Proceedings of the 30th ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education V. 2 (ITiCSE 2025). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 705–706. <https://doi.org/10.1145/3724389.3731283>
- Mannila, L., Henry, J., Bahr, T., Chytas, C., Connamacher, H., Hickman, H., Müller, B. C. N., Opel, S. & Scholl, A. (2025b): Towards Validating an Artificial Intelligence Concept Inventory for Non-Experts (AICI-NE): Common Misconceptions and Item Development. In Proceedings of the 2025 Working Group Reports on Innovation and Technology in Computer Science Education (ITiCSE-WGR '25). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA (eingereicht).

TrackVision – Erweiterter Wahrnehmungshorizont für automatisierte Rangierlokomotiven

Prof. Dr.-Ing. Christina Singer
Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)

Dip.-Ing. (FH) Ralf Falgenhauer
Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)

Zusammenfassung:

TrackVision erweitert den Wahrnehmungshorizont automatisierter Rangierlokomotiven, insbesondere bei langen Güterzügen. Das Ziel besteht darin, eine modulare Architektur zu entwickeln, die fahrzeug- und infrastrukturseitige Sensorik (Lidar, Radar, Kamera) vernetzt und über ein Track-Side-Management-System ein konsistentes Umgebungsmodell erzeugt. Dadurch sollen die Prozesse im Rangierbahnhof deutlich effizienter werden, während die Sicherheit beim automatisierten Rangieren jederzeit gewährleistet bleibt. Zentrale Schwerpunkte sind die Entwicklung geeigneter Architekturkonzepte und der Aufbau einer fotorealistischen Simulationsumgebung (Unreal Engine + MATLAB/Simulink) zur weiteren Evaluation dieser Wahrnehmungssysteme.

1. Projektdaten

| | |
|--------------------------------|--|
| Fördersumme | 35.000 Euro |
| Laufzeit | Januar bis November 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) |
| Projektleitung | Prof. Dr.-Ing. Christina Singer |
| Projektteam | Dipl.-Ing. (FH) Ralf Falgenhauer |
| Kontaktdaten Projektleitung | christina.singer@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

Um den zunehmenden Folgen der Klimaerwärmung entgegenzuwirken, ist es notwendig, den Gütertransport von der Straße auf die umweltfreundlichere Schiene zu verlagern (Hinweis: Ein Güterzug verursacht pro Tonne je Kilometer nur ein Viertel so viel Kohlendioxid (CO₂) wie ein LKW [1]). Die Bundesregierung hat sich daher zum Ziel gesetzt, den Schienengüterverkehr bis zum Jahr 2030 auf 25 Prozent zu steigern [2]. Dies kann nur gelingen, wenn die kosten- und zeitaufwendigen Rangieroperationen in den Rangierbahnhöfen effizienter gestaltet werden. Vor diesem Hintergrund wurde bereits im Jahr 2018 unter Mitwirkung des Instituts für Fahrzeugtechnik (IFZN) ein Demonstrator für eine vollautomatische Abdrücklokomotive für Ablaufberganlagen entwickelt, die das Umsetzen von einem in ein anderes Gleis automatisiert ausführen konnte. Im Folgeprojekt Rangierterminal4.0 wurde das Einsatzgebiet von automatisierten Rangierlokomotiven auf Flachbahnhöfen im Bereich der Hafenbahnen erweitert (vergleiche [3], [4]). Die zentrale Aufgabe bei der Automatisierung ist die vollumfängliche Einsetzbarkeit der Lokomotive für alle anfallenden Rangieraufgaben. Die bisherigen Projekte zielten darauf ab, einen Demonstrator zu entwickeln, der als Einzelfahrzeug oder mit maximal ein bis drei Wagen Rangieraufgaben umsetzen kann. Der durchschnittliche Güterzug fährt auf dem deutschen Schienennetz aber mit 25 bis 30 Güterwagen, was einer Zuglänge von 300 m und mehr entspricht. Hier setzen die aktuellen Forschungsarbeiten am IFZN an, die das automatisierte Rangieren größerer Zugkompositionen untersuchen.

Dabei werden zwei zentrale Herausforderungen adressiert. Die erste Herausforderung adressiert die hohen Sicherheitsanforderungen im automatisierten Rangierbetrieb. Aufgrund von langen Bremswegen bei großen Zugkonstellationen ist eine Umfelderkennung auf Distanzen von über 300 m gefordert, welche die Reichweite konventioneller Fahrzeugsensoren wie Lidar oder Radar übersteigt [5]. Zudem muss die Umfelderkennung auch bei schwierigen Witterungsverhältnissen und wechselnden Lichtverhältnissen zuverlässig und robust funktionieren. Die zweite Herausforderung betrifft die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit des Vorhabens. In Deutschland sind rund 2.800 Rangierlokomotiven verteilt auf circa 300 Unternehmen im Einsatz, von denen viele ein hohes Durchschnittsalter aufweisen (DB-Cargo-Flotte: circa 42 Jahre) [6]. Vor diesem Hintergrund erscheint eine kostspielige Flottenerneuerung nicht zielführend – zumal der Anschaffungspreis einer neuen Rangierlokomotive je nach Ausführung bei etwa 2,7 bis 3,5 Millionen Euro liegt [6]. Zudem verschärft der Fachkräftemangel bei Triebfahrzeugführenden die Situation [7].

Die Forschungsarbeiten am IFZN setzen an dieser Stelle an und verfolgen das Ziel, den Rangierbetrieb grundlegend zu modernisieren. Im Zentrum steht die Entwicklung einer innovativen, modularen und nachrüstbaren Automatisierungsarchitektur, die es ermöglicht, bestehende Rangierlokomotiven und Infrastruktur mit minimalem Aufwand in ein intelligentes, vernetztes Gesamtsystem zu integrieren. Die geplante Architektur kombiniert fahrzeugseitige Sensorik (zum Beispiel Lidar, Radar, Kamerasysteme) mit stationärer Infrastruktursensorik entlang der Gleise und vernetzt diese über eine Train-to-Ground-Kommunikation zu einem konsistenten digitalen Umgebungsmodell. Damit wird eine sichere Umfelderkennung über große Distanzen auch bei schlechten Sichtverhältnissen und komplexen Verkehrssituationen ermöglicht – eine Voraussetzung für automatisiertes Rangieren bei großen Zugkonstellationen mit langen Bremswegen. Gleichzeitig wird durch den Einsatz bestehender Technologien eine kosteneffiziente und skalierbare Umsetzung angestrebt.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Gesamtziel der Forschungsarbeiten am IFZN ist die Entwicklung einer Automatisierungsarchitektur für sichere, effiziente und nachhaltige Rangierbahnhöfe der Zukunft (siehe Abbildung 1). Die zu entwerfende Architektur (ein sogenanntes Track-Side-Management-System (TSMS)) soll die Umfeldinformationen der Rangierlokomotive und der Infrastruktur (sogenannte Track Side Units (TSU)) bündeln und zu einem konsistenten digitalen Umgebungsbild zusammenfügen. Basierend auf den jeweiligen Logistikanforderungen generiert das TSMS daraus Steuerbefehle für die automatisierte Lokomotive. Diese werden über standardisierte Schnittstellen übertragen und anschließend von der Lokomotive autonom ausgeführt. Somit können sichere, effiziente und nachhaltige Rangieraufgaben ganzheitlich automatisiert umgesetzt werden, mit dem Ziel ein Automatisierungslevel von GoA SO 3-4 [8] zu erreichen.

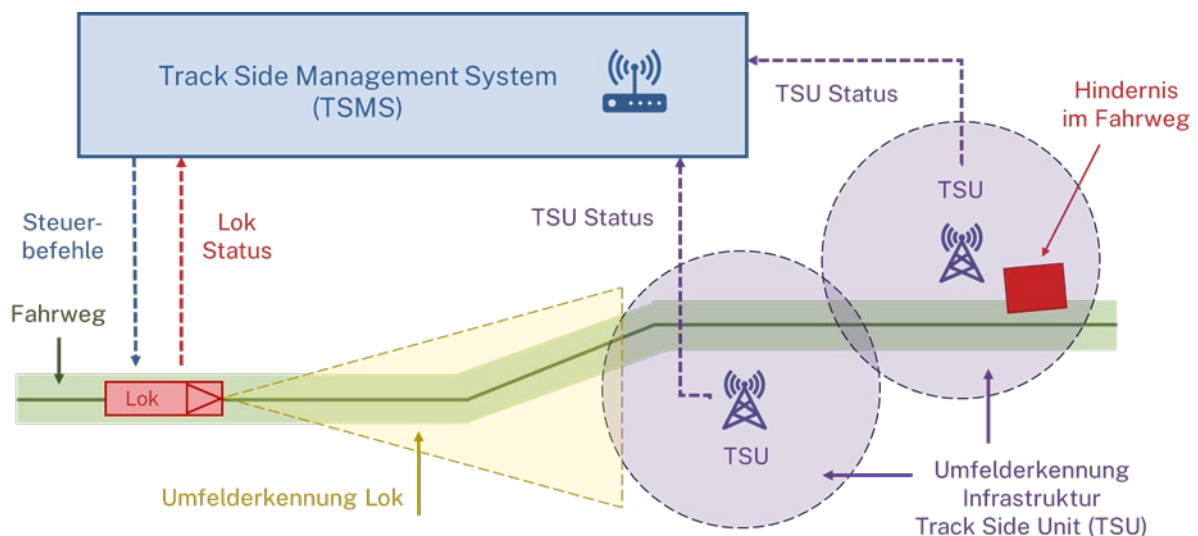


Abbildung 1: Zielbild Automatisierungsarchitektur für sichere, effiziente und nachhaltige Rangierbahnhöfe der Zukunft. Bild: IFZN

Im Vorlauftforschungsprojekt „TrackVision“ werden die methodischen und technischen Grundlagen für diese Architektur erarbeitet. Die wesentlichen Ziele sind:

- **Analyse des Stands der Technik:** Bewertung bestehender Automatisierungskonzepte im Schienenverkehr und deren Übertragbarkeit auf den Rangierbetrieb.
- **Ableitung von Anforderungen:** Definition der funktionalen und sicherheitstechnischen Anforderungen an die Hinderniserkennung und Umfeldwahrnehmung.
- **Entwicklung von Architekturkonzepten:** Konzeption und Vergleich verschiedener Ansätze zur Umfelderkennung (fahrzeugseitig, infrastrukturseitig, hybrid) und deren Integration in das TSMS.
- **Aufbau einer Simulationsumgebung:** Realisierung einer fotorealistischen Testumgebung mit Unreal Engine und Kopplung mit MATLAB/Simulink zur Generierung und Auswertung von Sensordaten für die weitere Evaluation der Wahrnehmungskonzepte.

Diese Ziele bilden die Grundlage für die spätere prototypische Umsetzung einer skalierbaren Automatisierungsarchitektur im Rangierbetrieb.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die Herangehensweise im Vorlaufforschungsprojekt „TrackVision“ orientiert sich an der Zielsetzung, die Grundlagen für eine erweiterte Umfeldwahrnehmung im Rangierbetrieb methodisch und technisch abzusichern. Ausgangspunkt ist eine Analyse des Stands der Technik und die Übertragung bestehender Automatisierungskonzepte auf die spezifischen Anforderungen des Rangierbetriebs. Darauf aufbauend werden die funktionalen und sicherheitstechnischen Anforderungen an die Hinderniserkennung definiert und in Architekturkonzepte überführt, die unterschiedliche Varianten der Umfelderkennung – fahrzeugseitig, infrastrukturseitig und hybrid – berücksichtigen.

Zur Validierung dieser Konzepte wird eine simulationsbasierte Testumgebung entwickelt, die fotorealistische Rangierszenarien in der Unreal Engine mit physikalisch korrekten Objektbewegungen und variablen Sichtbedingungen abbildet. Die Berechnung der Hindernisrelevanz erfolgen in MATLAB/Simulink. Diese Kopplung ermöglicht eine reproduzierbare Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Architekturvarianten unter realitätsnahen Bedingungen und schafft die Grundlage für die spätere prototypische Umsetzung.

4.1. Analyse zum Stand der Technik und Forschung

Zu Beginn wurden bestehende Automatisierungskonzepte im Strecken- und Rangierbetrieb untersucht, ergänzt durch Ansätze zur Nutzung von Infrastruktursensorik und relevanten Schnittstellen.

Automatisierung im Streckenverkehr

Der automatisierte Betrieb auf der Strecke folgt dem Prinzip ATO over ETCS, also dem automatischen Zugbetrieb auf Basis des europäischen Zugsicherungssystems, das eine lückenlose landseitige Überwachung des Zuges darstellt [9]. Für die Anwendung eines automatisierten Zugbetriebs wurden insgesamt vier unterschiedliche Automatisierungsgrade definiert, sogenannte Grades of Automation (GoA) [8]. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Abstufungen (GoA 1 für manuelles Fahren bis GoA 4 dem unbegleiteten fahrerlosen Betrieb) in der Übernahme von Funktionen, die entweder manuell durch den Menschen oder automatisiert durch das technische System durchgeführt werden [10]. Bereits in vielen Metropolen weltweit (unter anderem in Barcelona, Kopenhagen und Paris) sind automatisch fahrende Bahnen Stand der Technik [11]. Auch in Deutschland sind bereits vollautomatisierte Systeme im Serieneinsatz, wie zum Beispiel die fahrerlose U-Bahn in Nürnberg (→ GoA 3/4) [12]. Bei diesen Systemen ist das Schienennetz von außen jedoch nicht zugänglich. Im so genannten „Vollbahnbereich“ (Regional-, Fern- und Güterverkehr) werden automatisierte Fahrzeugsysteme in den kommenden Jahren ebenfalls zum Einsatz kommen. Beispielhafte Pilotprojekte sind die digitale S-Bahn Hamburg [13] (→ GoA 2-4), der digitale Knoten Stuttgart [14] (→ GoA 2) oder das Projekt Automated Train [15] (→ GoA 4).

Automatisierung im Rangierbetrieb

Der Rangierbetrieb unterscheidet sich vom Streckenbetrieb durch eine wesentlich dynamischere Betriebsumgebung und eine hohe Varianz an Fahrzeugkonfigurationen. Obwohl auch im Rangierbetrieb häufig die GoA-Stufen aus dem Streckenverkehr zur Klassifikation herangezogen werden, erweist sich dieses Vorgehen aufgrund der abweichenden betrieblichen Rahmenbedingungen nur als eingeschränkt geeignet. Daher gibt es Bestrebungen, eigenständige Automatisierungsstufen für den Rangierbetrieb zu etablieren – sogenannte Grades of Automation for Shunting Operations (GoA SO) [16]. Darin bezeichnet der Grad 0 die manuelle Durchführung aller Tätigkeiten, ein Grad 1 eine teilweise Unterstützung des Personals (zum Beispiel elektronische Übergabe der Zugdokumente), ein Grad 2 das Arbeiten mit einer automatischen Kuppelung der Wagen, ein Grad 3 die Möglichkeit, alle Prozesse mit einem einzigen Mitarbeitenden abzuwickeln und der Grad 4 den vollautomatisierten Betrieb ohne weiteres Personal [16]. Erste Umsetzungen (teil-)automatisierter Rangierlokomotiven werden nachfolgend vorgestellt. Mit der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für rangierende Güterzüge beschäftigen sich die Forschungsprojekte SAMIRA 1 und 2 (Shunting Assistant and Monitoring Interface for Autonomous Rail Applications) [17]. Hier wird ein tragbares Multi-sensormodul entwickelt (unter anderem mit Lidar-, Radar- und Kamerasensorik), das am letzten Waggon einer Rangierabteilung befestigt wird. Das Modul ermöglicht der beziehungsweise dem Triebfahrzeugführenden eine nahtlose und sichere Überwachung des Gleisbereichs, insbesondere bei geschobenen Fahrten. Die Sensordaten werden in Echtzeit in den Führerstand übertragen, ergänzt durch ein Human-Machine-Interface, das der beziehungsweise dem Triebfahrzeugführenden zusätzliche Informationen wie Bremswegprognosen liefert (GoA SO 1). Im Forschungsprojekt VAL (Vollautomatische Abdrücklokomotive) [18]

entwickelt derzeit die DB Cargo gemeinsam mit Projektpartnerinnen und -partnern eine automatisierte Rangierlokomotive (GoA SO 3). Basis für die Umfelderkennung ist eine umfangreiche On-Board-Sensorik (ein 4D-Lidarsensor, mehrere Kameras sowie ein hochgenaues Ortungssystem, das eine Lokalisierung in der digitalen Karte ermöglicht). Neben der Entwicklung des Automatisierungssystems liegt ein weiterer Forschungsschwerpunkt auf dem Aufbau und der Anwendung einer neuartigen Testmethodik für die Lokomotiven und die Vorbereitung der Serienzulassung.

Nutzung von Infrastruktursensorik im Güterverkehr

An vielen Rangierbahnhöfen werden zum Perimeterschutz Überwachungsanlagen auf Basis von Umfeldsensorik (meist Kamerasensorik, aber auch Radar- und/oder Lidarsensorik) eingesetzt. Hier sind vielfältige Lösungen diverser Anbieter am Markt verfügbar. Der Fokus dieser Systeme liegt auf der Sicherung des Bahngeländes vor unbefugtem Zutritt, Sabotage oder anderen Sicherheitsrisiken [19]. Im Rahmen der Errichtung des digitalen Testfeldes Niedersächsischer Häfen wurden im Projekt RaDaR 4.0 Kamerasysteme genutzt, um die Ein- und Ausfahrten auf Hafenbahnanlagen zu erfassen und mittels offener Schnittstellen zur Optimierung der logistischen Prozesse in den Häfen zu nutzen [20]. Zur Diagnose von Güterwagen werden seit 2022 von der DB Cargo Kamerabridges eingesetzt. Diese erstellen Bilder durchfahrender Güterwagen aus verschiedenen Perspektiven und stellen diese Mitarbeitenden zur Verfügung. Auf Basis der Bilder beauftragen diese dann die Durchführung von Instandhaltungsleistungen. Die Mitarbeitenden werden dabei durch den Einsatz von Künstlicher-Intelligenz-(KI-)Methoden unterstützt [21].

Relevante Schnittstellen für die Automatisierung im Bahnbereich

Bei der Entwicklung einer Automatisierungsarchitektur für zukünftige Rangierbahnhöfe sind weitere Technologien zu berücksichtigen. Zu nennen ist hier das Digitale Register [22], eine Initiative, die eine einheitliche Datengrundlage für den digitalen Bahnbetrieb entwickelt. Das Register enthält sowohl 3D-Daten als auch Topologie-Daten der gesamten Bahninfrastruktur und aller gleisnahen Anlagen. Die Daten werden zentral bereitgestellt und laufend aktualisiert. Die Daten bieten damit unter anderem die Grundlage für hochauflösende Digitale Karten (HD-Maps) des Schienennetzes, die für die Automatisierung genutzt werden können. Weiterhin relevant ist das Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) [23], ein Standard für drahtlose Kommunikation für Schienenverkehrssysteme, der vom Internationalen Eisenbahnverband (UIC) gemeinsam mit der Europäischen Union (EU) und Unternehmen der Eisenbahnindustrie entwickelt wird und auf dem Mobilfunkstandard 5G basiert. Eine im Rangierbereich bereits etablierte Funkchnittstelle ist die konventionelle Funkfernsteuerung (vergleiche DIN EN 50239 [24]). Sie ermöglicht es den Triebfahrzeugführern, die Lokomotive außerhalb des Führerstandes zu steuern – etwa bei geschobenen Zügen direkt von der Zugspitze aus. Der RTO-Betrieb (Remote Train Operation) ist eine erweiterte Form der Funkfernsteuerung, bei der das Bedienpersonal nicht mehr in Sichtweite der Lokomotive ist. Insbesondere im Übergang vom konventionellen zum vollautomatisiertem Rangierbetrieb kann diese Kommunikationstechnologie eine wichtige Zwischenlösung darstellen. Eine weitere Schlüsseltechnologie ist die Digitale Automatische Kupplung (DAK), die das bisher manuell durchgeführte An- und Abkoppeln der Güterwagen durch eine automatisierte Lösung ersetzen soll und durch eine Integration einer durchgängigen Daten- und Stromleitung Potenzial für weitere Innovationen bietet [25]. Im EU-Projekt X2Rail (Shift2Rail-Initiative) wurde auf Basis des europäischen Zugleit- und Sicherungssystem eine Referenzarchitektur für den automatisierten Bahnbetrieb mit ETCS und Automatisierungslevel GoA 3/4 entwickelt [26]. Relevante Module dieser Architektur umfassen Umwelterfassung, Fahrbefehlsgenerierung, Zugsicherung, Verkehrssteuerung und Disposition. Teile der definierten Schnittstellen sind bereits in konkrete Spezifikationen (sogenannte Subsets) überführt, darunter SS-139 (Fahrzeugsteuerung), SS-034 (Fahrgastinformationssystem) und SS-026 (Zug-Land-Anbindung), wobei SS-034 und SS-026 auch in der aktuellen TSI Loc&Pas (Technische Spezifikation Interoperabilität – Teil Lokomotiven und Personenwagen) benannt sind [27]. Da sich der Rangierbetrieb jedoch grundlegend vom Streckenbetrieb unterscheidet (zum Beispiel keine ETCS-Zugsicherung), ist eine direkte Übernahme der Architektur nicht möglich.

4.2. Ermittlung der Anforderungen

Die Automatisierung des Rangierbetriebs erfordert eine zuverlässige und sichere Umfeldwahrnehmung. Das System muss Hindernisse im Fahrweg so früh erkennen, dass ausreichend Zeit für eine situationsgerechte Reaktion bleibt. Die Anforderungen (siehe nachfolgende Tabelle) ergeben sich aus den betrieblichen Rahmenbedingungen und den spezifischen Herausforderungen des Rangierbetriebs sowie aus den Vorgaben des Lastenhefts „Hinderniserkennung Fahrweg“ der Deutschen Bahn [28].

Der zu überwachende Bereich umfasst das Lichtraumprofil im Gleisbereich sowie den Bahnsteigkantenbereich. Die Hinderniserkennung muss über eine Distanz erfolgen, die dem Anhalteweg entspricht, was bei langen Zugkompositionen eine erhebliche Reichweite erfordert. Zudem muss die Erkennung auch unter erschwerten Sichtbedingungen wie Dunkelheit, Nebel, Regen oder Schneefall zuverlässig funktionieren.

Zu den zu detektierenden Objekten zählen Personen und abgestellte Wagen im Fahrweg sowie weitere Hindernisse aus typischen Materialien wie Metall, Holz, Stein oder Beton und große Tiere. Bauliche Anlagen sowie Vögel, Laub, Regen und Schnee dürfen nicht als Hindernisse gewertet werden. Zusätzlich müssen Infrastrukturelemente wie Signale und Weichen neben dem Fahrweg erkannt werden, ohne als Hindernis klassifiziert zu werden. Für bewegte Objekte ist die Bestimmung des Bewegungsvektors erforderlich. Darüber hinaus ist für bestimmte Objekte eine Klassifizierung zielführend, zum Beispiel für Personen, um diese bei der Vorbeifahrt zu warnen oder bei Wagen, um diese beim automatisierten Ansetzen der Lokomotive als solche zu erkennen.

Die Umfeldwahrnehmung unterliegt den besonderen Herausforderungen des Schienenverkehrs. Im Gegensatz zu Straßenfahrzeugen ist der Fahrweg festgelegt, sodass ein Ausweichen nicht möglich ist. Die Bremswege sind aufgrund des geringen Reibkoeffizienten zwischen Rad und Schiene und der hohen Zugmassen sehr lang, weshalb Hindernisse aus großer Entfernung erkannt werden müssen. Hinzu kommt, dass Eisenbahninfrastrukturelemente, wie Signale, Strom- und Lichtmasten, nahe am zum zu überwachenden Lichtraumprofil des Fahrwegs liegen und nicht als Hindernis gewertet werden dürfen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Sensorik aufgrund des Spurspiels einem nicht definierten Gierwinkel unterliegt. Die automatisierte Wahrnehmung muss daher sehr präzise sein und die Objektposition relativ zum Fahrweg sehr genau bestimmen. Eine weitere Herausforderung, die speziell im Rangierbetrieb auftritt, ist, dass Wagen sowohl gezogen als auch geschoben werden. Damit ist eine Überwachung bei automatisierten Systemen nicht immer von der Lokomotive aus möglich, sondern muss von der Zugspitze oder aus der Infrastruktur heraus erfolgen. Vorteilhaft bei der Umfelderkennung von Rangierlokomotiven sind hingegen die geringen Rangiergeschwindigkeiten (maximal 25 km/h), die aus dem Rangierauftrag vorhandenen präzisen Geodaten des Fahrwegs sowie die abgegrenzten räumlichen Bereiche, die nicht öffentlich zugänglich sind.

Hinsichtlich der Sicherheit sind strenge Vorgaben einzuhalten. Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Erkennungsmechanismus sowie die Zuverlässigkeit der Hardware müssen einschlägigen Normen entsprechen. Die Reaktionszeit des Automatisierungssystems ist zudem kritisch: Wird ein Hindernis erkannt, muss die Meldung nahezu verzögerungsfrei erfolgen. Die Kommunikation zwischen Lokomotive und Infrastruktur muss darüber hinaus über sichere Schnittstellen erfolgen. Außerdem sind die physikalischen Umweltbedingungen wie Temperatur, Feuchtigkeit, mechanische Belastung und elektromagnetische Verträglichkeit zu berücksichtigen.

Die Funktionsfähigkeit des Systems ist durch einen Vergleich mit der menschlichen Erkennungsleistung nachzuweisen. Dazu werden Prüfobjekte unterschiedlicher Größe und Erkennbarkeit in großen Entfernungen eingesetzt. Die Erkennungswahrscheinlichkeit muss mindestens dem Leistungsvermögen einer beziehungsweise eines Triebfahrzeugführenden entsprechen.

Tabella 1: Anforderungen

| Nr. | Kategorie | Anforderung |
|-----|------------------------------|--|
| 1 | Überwachungsbereich | Lichtraumprofil nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) zusätzlicher Bahnsteigbereich (Breite 300 – 850 mm, Höhe 1000 mm) |
| 2 | Reichweite | Überwachung bis zum Betriebsbremsweg Beispiele nach [29]: 1x RL, 20 SW bei 35 km/h: Betriebsbremsweg circa 90 m 1x RL, 20 SW bei 40 km/h: Betriebsbremsweg circa 200 m Annahmen: RL = Rangierlokomotive (Diesel 350 kW, 13 m lang) SW = Schiebewandwagen (4-achsig, 24 m lang) |
| 3 | Zu detektierende Hindernisse | Personen, Wagen, große Tiere, Objekte aus Metall/Holz/Stein/Beton $\geq 0,4 \text{ m}^2$ |
| 4 | Ausschlüsse für Detektion | Vögel, Laub, Regen, Schnee, bauliche Anlagen |
| 5 | Bewegte Objekte | Für Hindernisse nach Nummer 3, die sich bewegen, muss ein Bewegungsvektor bestimmt werden. |
| 6 | Klassifizierung | Personen und Wagen sind als solche zu klassifizieren. |
| 7 | Zugkonstellation | Die Überwachung des Fahrwegs muss bei geschobenen und gezogenen Einheiten möglich sein. |
| 8 | Reaktionszeit | Hindernismeldung innerhalb 0,1 s; maximal 0,5 s bei plötzlichem Auftreten. |
| 9 | Sicherheit | Versagenswahrscheinlichkeit $\leq 5 \times 10^{-4}$; bei schlechten Sichtbedingungen $\leq 2,5 \times 10^{-3}$ |
| 10 | Ausfallrate Hardware | $< 4 \times 10^{-6}$ pro Stunde |
| 11 | Zuverlässigkeit | Mean Time Between Failures (MTBF): 14.000 h Mean Time To Repair (MTTR): 1 h Brauchbarkeitsdauer: 10 Jahre |
| 12 | Fehlalarmrate | Mittlere Zeit zwischen zwei Fehlalarmen $\geq 10.000 \text{ h}$ |
| 13 | Umweltbedingungen | Temperatur, Feuchte, Schock, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gemäß EN 50155 |
| 14 | Schnittstellen | Sichere Kommunikation gemäß EN 50159-1/-2 |

4.3. Automatisierungsarchitekturen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Anforderungen an die Umfeldwahrnehmung verdeutlichen, dass eine rein fahrzeugseitige Lösung die geforderte Reichweite und Robustheit nur eingeschränkt gewährleisten kann. Insbesondere die langen Bremswege, verdeckte Gleisbereiche und variierende Sichtbedingungen erfordern Konzepte, die den Wahrnehmungshorizont über die Möglichkeiten einzelner Sensoren auf der Lokomotive hinaus erweitern. Vor diesem Hintergrund werden verschiedene Architekturansätze untersucht, die sich in der Verteilung der Sensorik und der Datenverarbeitung unterscheiden.

Die Konzeption der Automatisierungsarchitektur zielt darauf ab, die Umfelderkennung so zu gestalten, dass sicherheitskritische Informationen zuverlässig und in Echtzeit bereitgestellt werden. Dabei stehen drei Grundvarianten im Fokus: eine Architektur mit ausschließlich fahrzeuggebundener Sensorik, eine Lösung mit infrastrukturseitiger Sensorik sowie ein hybrider Ansatz, der beide Systeme kombiniert. Jede dieser Varianten bietet spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich Reichweite, Kosten, Skalierbarkeit und Integrationsaufwand. Im Folgenden werden die Konzepte beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung für den automatisierten Rangierbetrieb bewertet.

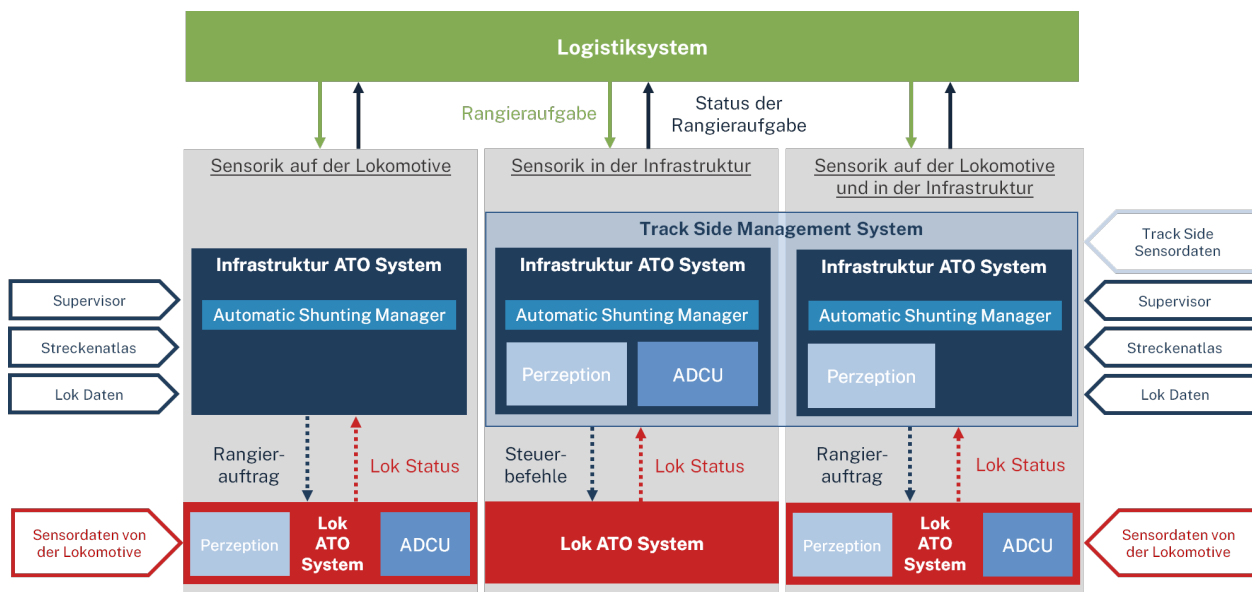


Abbildung 2: Vergleich verschiedener Automatisierungsarchitekturen. Bild: IFZN

Die Abwicklung der Rangieraufgaben basiert auf einem übergeordneten Konzept: Das Logistiksystem stellt die Rangieraufgaben bereit, die definieren, wann bestimmte Züge an ihren Zielort gebracht werden sollen. Diese Aufgaben enthalten neben Start- und Zielinformationen auch Abfahrts- und Ankunftszeiten sowie die Zugkonstellationen. Der Automatic Shunting Manager im Infrastruktur-ATO-System übernimmt diese Daten, wählt eine geeignete Lokomotive aus und generiert auf Basis des digitalen Streckenatlas und der Lokdaten die Rangieraufträge sowie deren effizienteste Ausführungsreihenfolge. Für die Umfelderkennung kann der Wahrnehmungshorizont grundsätzlich auf der Lokomotive, in der Infrastruktur oder durch eine Kombination beider Ansätze realisiert werden. Damit ergeben sich drei Automatisierungsvarianten:

Konzept 1: Sensorik auf der Lokomotive

Bei diesem Konzept erfolgt die gesamte Umfelderkennung einschließlich der Datenauswertung ausschließlich auf der Lokomotive und basiert vollständig auf den Daten der Loksensoren. Die Lokomotive erhält vom Automatic Shunting Manager einen Rangierauftrag, der Fahrweg, das Ziel sowie die Zugkonstellation beschreibt. Das On-Board-Perceptionsmodul verarbeitet die Sensordaten und erstellt eine sogenannte Objektliste, also eine strukturierte Zusammenstellung aller erkannten Objekte im überwachten Bereich mit deren Position und relevanten Eigenschaften. Diese Informationen werden in der Autonomous Decision and Control Unit (ADCU) weiterverarbeitet, die unter Verwendung der Fahrwegdaten aus dem Rangierauftrag und der aktuellen Lokposition die Hindernisrelevanz sowie die Entfernung zu möglichen Hindernissen berechnet. Auf dieser Grundlage werden Steuerbefehle abgeleitet, sodass die Lokomotive den Rangierauftrag selbstständig ausführen kann.

Der wesentliche Vorteil dieser Architektur liegt darin, dass keine Anpassungen an der Infrastruktur erforderlich sind und die Lokomotive unabhängig vom Standort eingesetzt werden kann. Die gesamte Verarbeitung erfolgt lokal, wodurch die Abhängigkeit von Kommunikationsverbindungen reduziert wird. Allerdings ist die Lokomotive allein auf den Erfassungsbereich ihrer eigenen Sensorik angewiesen, was die Reichweite der Objekterfassung begrenzt, und die Erkennung verdeckter Bereiche erschwert. Zudem ist ein hoher Nachrüstungsaufwand für jede Lokomotive erforderlich, was die Implementierung kostenintensiv macht.

Konzept 2: Sensorik in der Infrastruktur

Bei diesem Konzept erfolgt die Umfelderkennung ausschließlich über Sensoren, die entlang der Gleisinfrastruktur installiert sind. Die komplette Datenauswertung findet zentral im TSMS statt. Dort werden die Sensordaten verarbeitet und Objekte in der Fahrumgebung detektiert. Um den Rechenaufwand und die Datenmenge zu reduzieren, erfolgt die Auswertung rangierauftrags- und damit fahrwegspezifisch: Für jeden Rangierauftrag werden nur die Daten von Sensoren berücksichtigt, deren Erfassungsbereich mit dem Fahrweg

dieses Auftrags übereinstimmt. Auf dieser Basis erstellt das Perzeptionsmodul eine strukturierte Zusammenstellung der relevanten Objekte und berechnet unter Verwendung der Fahrweginformationen sowie der von der Lokomotive übermittelten Positionsdaten die Entfernung zu möglichen Hindernissen.

Die Lokomotive kann mit diesen Informationen ferngesteuert werden, indem die ADCU Steuerbefehle an die Loksteuerung übermittelt. Für diese Variante ist keine komplexe Umfeldsensorik an Bord erforderlich; die Lokomotive benötigt lediglich ein Ortungssystem und einfache Abstandssensoren für das Ansetzen von Wagen. Dadurch lässt sich die Automatisierung vergleichsweise kostengünstig umsetzen.

Der Vorteil dieser Architektur liegt darin, dass Lokomotiven in einer mit Sensorik ausgestatteten Infrastruktur mit minimalem Nachrüstungsaufwand betrieben werden können. Sie benötigen nur wenige zusätzliche Komponenten, die relativ einfach an das bestehende Loksystem angeschlossen werden können, was die Integration erleichtert. Nachteilig ist jedoch der hohe Installationsaufwand für die Infrastruktur sowie die eingeschränkte Flexibilität, da die Funktionalität an die Ausstattung des jeweiligen Rangierbahnhofs gebunden ist.

Konzept 3: Sensorik auf der Lokomotive und in der Infrastruktur

Die hybride Architektur kombiniert fahrzeugseitige und infrastrukturseitige Sensorik, um die Vorteile beider Ansätze zu vereinen. Die Lokomotive erfasst die Umgebung über eigene Sensoren wie Lidar, Radar und Kameras, während zusätzlich stationäre Sensoren entlang der Gleisinfrastruktur ebenfalls Umfelddaten bereitstellen. Im TSMS werden Fahrweg- und Positions- und Umfeldinformationen zusammengeführt. Das dortige Perzeptionsmodul berechnet die Hindernisrelevanz der Objektdaten aus der Infrastruktur, wodurch verdeckte Bereiche und große Distanzen zuverlässig überwacht werden können. Wird ein Hindernis detektiert, übermittelt das TSMS der Lokomotive die dazugehörige Entfernung auf dem Fahrweg. Das On-Board-Perzeptionsmodul auf der Lokomotive wertet seinerseits die von der Loksensoren bereitgestellten Sensordaten aus, und ermittelt für detektierte Hindernisse den daraus resultierenden Restfahrweg. Die von beiden Systemen ermittelten Hindernisdistanzen werden anschließend im Perzeptionsmodul auf der Lokomotive fusioniert. Auf dieser Grundlage können dann in der ADCU des Lok-ATO-Systems Steuerbefehle generiert werden, die eine präzise und sichere Ausführung des Rangierauftrags ermöglichen.

Der große Vorteil dieser Architektur liegt in der maximalen Erweiterung des Wahrnehmungshorizonts und der hohen Robustheit gegenüber schwierigen Sichtbedingungen und komplexen Gleisgeometrien. Durch die redundante Datenbasis können sicherheitskritische Situationen frühzeitig erkannt werden. Nachteilig sind jedoch der hohe Integrationsaufwand, die komplexe Datenfusion und die damit verbundenen Kosten für die Ausstattung sowohl der Lokomotiven als auch der Infrastruktur.

Die drei Konzepte unterscheiden sich deutlich hinsichtlich Reichweite, Integrationsaufwand, Kosten und Flexibilität. Während die fahrzeugseitige Lösung eine hohe Unabhängigkeit von der Infrastruktur bietet, ist ihre Reichweite begrenzt. Die infrastrukturseitige Variante ermöglicht eine kostengünstige Automatisierung der Lokomotiven, erfordert jedoch eine umfassende Ausstattung des Rangierbahnhofs. Die hybride Architektur bietet die höchste Sicherheit und den größten Wahrnehmungshorizont. Diese Redundanz ist die alleinige konzeptionelle Voraussetzung, um die hohen Anforderungen an die Reichweite (Anforderung 2) bei langen Zugkompositionen sowie die strenge Versagenswahrscheinlichkeit (Anforderung 9) gemäß den Sicherheitsvorgaben des Rangierbetriebs zu erfüllen.

Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Konzepte ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Vergleich der Konzepte

| Kriterium | Konzept 1: Sensorik auf der Lokomotive | Konzept 2: Sensorik in der Infrastruktur | Konzept 3: Hybride Architektur |
|-------------------------------|--|--|--|
| Sensorposition | Fahrzeugseitige Sensorik auf der Lokomotive | Stationäre Sensoren entlang der Gleisinfrastruktur | Kombination aus fahrzeugseitiger und stationärer Sensorik |
| Datenverarbeitung | On-Board-Perzeptionsmodul und ADCU auf der Lokomotive | TSMS mit fahrwegspezifischer Auswertung | Zusammenführung der errechneten Hindernisdistanzen unterschiedlicher Sensoren auf der Lokomotive |
| Wahrnehmungshorizont | Begrenzt durch Reichweite der Loksensoren | Sehr groß, abhängig von Infrastrukturabdeckung | Maximal, durch redundante Datenquellen |
| Erkennung verdeckter Bereiche | Eingeschränkt | Gut möglich durch verteilte Sensorik | Sehr gut, durch redundante Sicht |
| Integrationsaufwand | Hoch (Nachrüstung jeder Lok) | Mittel bis hoch (Installation im Bahnhof) | Sehr hoch (beide Systeme + Vernetzung) |
| Kostenstruktur | Hohe Kosten pro Lokomotive | Hohe Investition in Infrastruktur | Höchste Kosten durch Doppelaufwand |
| Skalierbarkeit | Gut für einzelne Loks | Gut für große Rangierbahnhöfe | Eingeschränkt, komplexe Koordination |
| Robustheit bei Witterung | Abhängig von eingesetzten Sensorarten; keine Redundanz bei Ausfall | Abhängig von Sensorarten; teilweise Redundanz durch mehrere Infrastruktur-Sensoren | Höchste Robustheit durch Redundanz und Datenfusion |
| Kommunikationsbedarf | Gering (lokal) | Hoch (Datenübertragung zum TSMS) | Sehr hoch (Fusion) |
| Besonderheiten | Unabhängig von Infrastruktur, aber begrenzte Reichweite | Kostengünstige Lokomotiv-Automatisierung, jedoch ortsgebunden | Maximale Sicherheit und Redundanz, aber hoher technischer Aufwand |

4.4. Aufbau der Simulationsumgebung

Die in Kapitel 4.3 beschriebenen Automatisierungsarchitekturen verdeutlichen die Komplexität der Wahrnehmungs- und Steuerungsaufgaben im Rangierbetrieb. Um diese Konzepte effizient zu validieren und weiterzuentwickeln, ist eine leistungsfähige Simulationsumgebung erforderlich.

Virtuelle Testumgebungen sind im Bahnbereich unverzichtbar, da sie eine sichere, kosteneffiziente und flexible Möglichkeit bieten, automatisierte Systeme unter realitätsnahen Bedingungen zu prüfen. Sie haben sich als wesentliches Entwicklungswerkzeug bewährt [15], weil sie folgende Vorteile bieten:

- Reproduzierbarkeit: Szenarien können beliebig oft unter identischen Bedingungen wiederholt werden.
- Hohe Szenarienvielfalt: Tausende von Betriebs- und Störsituationen lassen sich in kurzer Zeit durchspielen.
- Einfache Anpassung der Randbedingungen: Witterung, Lichtverhältnisse, Gleisgeometrien oder Zugkonstellationen können flexibel variiert werden.
- Kosten- und Zeitersparnis: Aufwendige Feldtests werden reduziert, was die Entwicklungszyklen erheblich verkürzt.
- Verfügbarkeit und Sicherheit: Tests können unabhängig von Streckensperrungen oder Betriebsrisiken durchgeführt werden.

Im Rangierbetrieb treffen Herausforderungen wie komplexe Gleisgeometrien, wechselnde Zuglängen und verdeckte Sichtbereiche aufeinander. Hinzu kommen lange Bremswege, die eine frühzeitige Hinderniserkennung erfordern, sowie stark variierende Umweltbedingungen wie Nebel, Schnee, Regen oder Dunkelheit. Diese Faktoren machen reale Tests nicht nur kostenintensiv, sondern auch schwer reproduzierbar. Virtuelle Simulationsumgebungen bieten hier eine besonders effiziente Lösung: Sie ermöglichen die sichere

und flexible Nachbildung kritischer Szenarien, die in der Realität nur mit hohem Aufwand oder gar nicht darstellbar wären. Durch die Kombination aus fotorealistischer Umgebung, variablen Randbedingungen und automatisierter Datenauswertung können selbst seltene auftretende Extremfälle systematisch untersucht und die Leistungsfähigkeit der Automatisierungskonzepte unter kontrollierten Bedingungen validiert werden.

Für die Simulation der Umfelderkennung fiel die Wahl auf Lidar-Sensoren [5], da sie eine hohe Genauigkeit und Detailtiefe bieten. Das Messprinzip basiert auf der Laufzeitmessung von Laserimpulsen: Der Sensor sendet kurze Lichtimpulse aus, die von Objekten reflektiert werden. Aus der Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Empfang des reflektierten Signals wird die Entfernung berechnet. Durch schnelles Abtasten in mehreren Richtungen entsteht eine dreidimensionale Punktwolke, die die Umgebung geometrisch exakt abbildet. Diese Technologie bietet den Vorteil einer hohen Auflösung und direkten Positionsmessung, was eine präzise Hinderniserkennung unabhängig von wechselnden Lichtverhältnissen ermöglicht. Allerdings ist Lidar witterungsempfindlich: Regen, Schnee oder Nebel können die Reichweite und Signalqualität beeinträchtigen. Zudem sind die Sensoren kostenintensiver als Radar oder Kameras und ihre Reichweite ist für sehr große Distanzen begrenzt. Trotz dieser Einschränkungen ist Lidar für den Rangierbetrieb besonders geeignet, da hier präzise Erkennung bei niedrigen Geschwindigkeiten und komplexer Gleisgeometrie entscheidend ist.

Für die simulative Generierung von Sensordaten wird eine echtzeitfähige und fotorealistische Simulationsplattform benötigt. Hier fiel die Wahl auf die 3D-Entwicklungsumgebung Unreal Engine von Epic Games [30]. Mit der Unreal Engine können fotorealistische Umgebungen erstellt und physikalische Zusammenhänge abgebildet werden. Dies ermöglicht realistische Bewegungen von Objekten wie Fahrzeugen oder Personen sowie die Simulation variabler Umweltbedingungen (Regen, Nebel, Schnee). Zur Sensorsimulation können eigene Programme mittels Blueprint- oder C++-Programmierung integriert werden.

Für die Simulation des Track Side Management Systems wurde MATLAB/Simulink [31] als Entwicklungsumgebung ausgewählt. Dort erfolgt die Berechnung der Hindernisrelevanz und die Generierung von Steuerbefehlen für die Lokomotive. Die Kopplung zwischen Unreal Engine und MATLAB/Simulink erfolgt über eine Co-Simulationsschnittstelle, die den Austausch von Sensordaten und Steuerbefehlen in Echtzeit ermöglicht. Die Kommunikation wird über das User Datagram Protocol (UDP) realisiert.

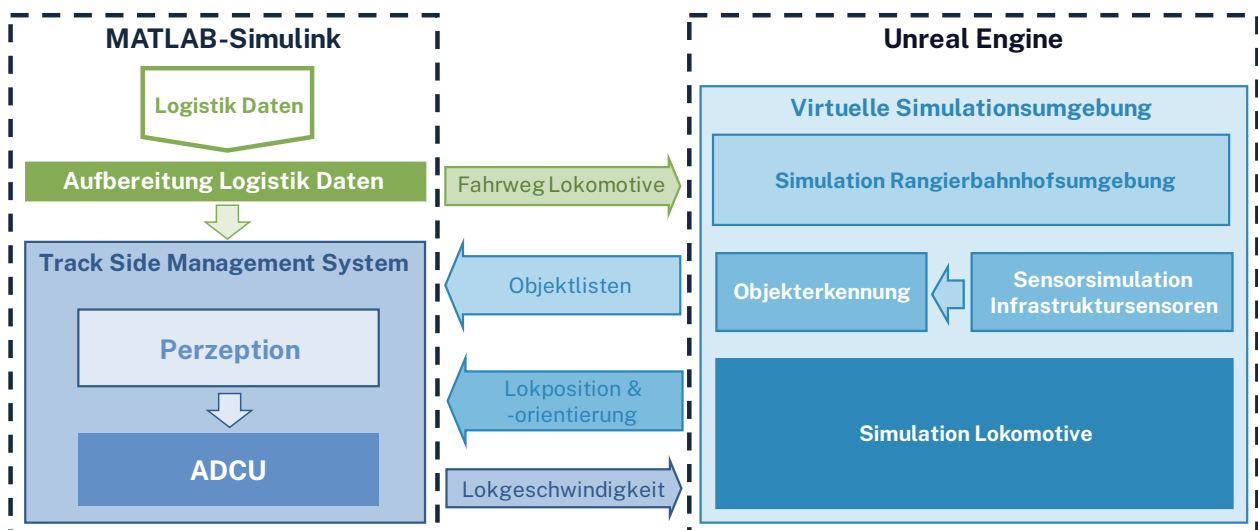


Abbildung 3: Aufbau der Simulationsumgebung; Matlab/Simulink / Unreal Engine. Bild: IFZN

Der Simulationsworkflow (siehe Abbildung 3) umfasst folgende Schritte: Zunächst werden Logistikdaten (Rangierauftrag, Zugkonstellation) in MATLAB/Simulink generiert und an das Track Side Management System übergeben. Gleichzeitig werden Fahrwegdaten aus dem Rangierauftrag für die Pfadgenerierung an die Unreal Engine übertragen. In der Unreal Engine werden die zu testenden Szenarien aufgebaut und die Sensorik entsprechend integriert. Bei der Ausführung der Szenarien generiert die Unreal Engine Objektdaten und die aktuelle Lokposition. Diese werden dann im Perzeptionsmodul auf der MATLAB/Simulink Seite ausgewertet. Auf dieser Basis werden in der ADCU Steuerbefehle berechnet und die daraus resultierende Sollgeschwindigkeit an die Unreal Engine zurückgegeben, um die Bewegung der Lokomotive zu steuern.

Diese Architektur ermöglicht eine realitätsnahe, reproduzierbare und skalierbare Testumgebung für die Validierung von Automatisierungskonzepten im Rangierbetrieb.

4.5. Ergebnisse

Im Rahmen der Vorlaufforschung lag das primäre Ergebnis in der erfolgreichen Realisierung der funktionsfähigen Simulationsumgebung, die die methodische Grundlage für die weiterführende, systematische Evaluierung der Architekturvarianten (Konzept 1 bis 3) schafft. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben daher den Aufbau und Workflow dieser Umgebung.

Simulationsumgebung Unreal Engine (Generierung der Objektdaten)

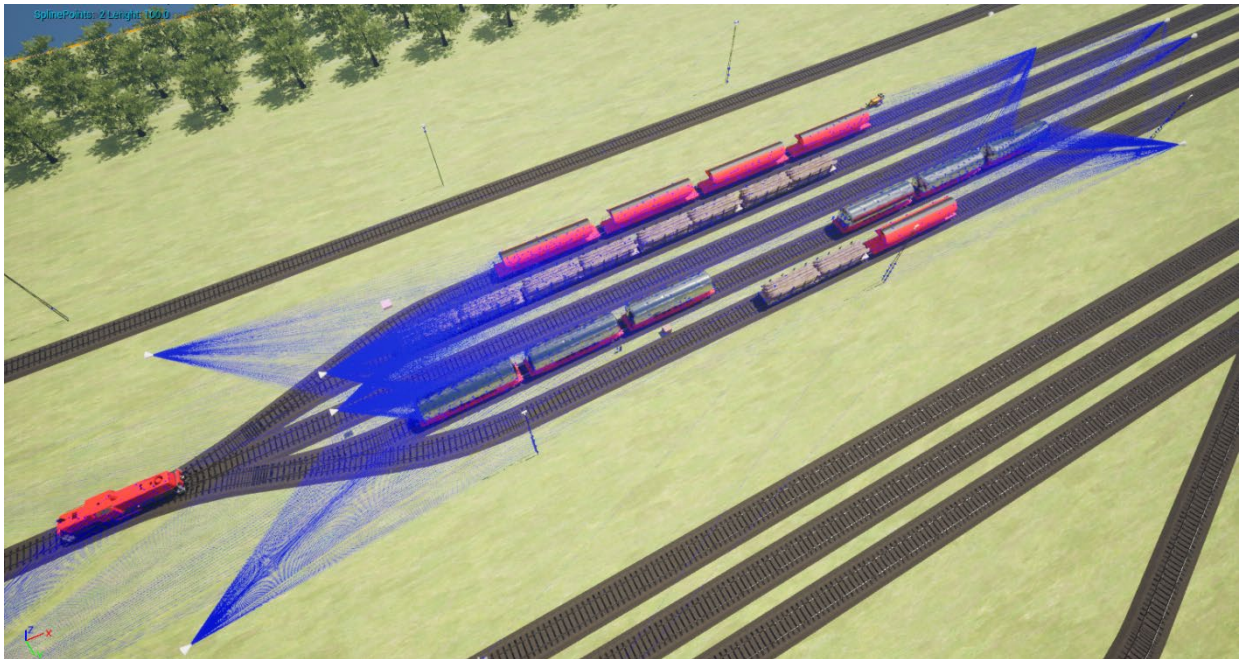


Abbildung 4: Positionierung der Umfoldsensoren im Testumfeld der Unreal Engine. Bild: IFZN

In der Simulationsumgebung der Unreal Engine können realistische Szenarien von Rangierbahnhöfen erstellt werden, die typische Umgebungsobjekte wie Gleise, Wagen, andere Lokomotiven, Signale oder Personen enthalten. Mithilfe der Eingangsparameter (Fahrwegverlauf der Lokomotive und Lokgeschwindigkeit) aus dem MATLAB/Simulink-Modell kann der virtuelle Zug innerhalb dieser Umgebung bewegt werden. Zur Simulation von Infrastruktursensorik werden an ausgewählten Stellen Sensoren platziert, die entsprechend ihres Typs (Lidar, Kamera, Radar), parametrisiert werden (siehe Abbildung 4). Einstellparameter sind dabei unter anderem Öffnungswinkel, Auflösung und Reichweite. Mit Hilfe dieser Sensoren kann nun die Umgebung erfasst werden. Ziel ist es dabei, Objekte zu erkennen und für jedes Objekt die Position, Größe und Klasse (zum Beispiel Mensch, Wagen) zu bestimmen. Diese Objektdaten werden dann zu Objektlisten zusammengefasst und zusammen mit der aktuellen Lokposition an das TSMS in MATLAB/Simulink übergeben.

Im Fall der im Projekt implementierten Lidarsensorik werden in der Unreal Engine ausgehend von der jeweiligen Sensorposition Laserimpulse in Abhängigkeit der Einstellparameter (Sensoröffnungswinkel, Auflösung und Reichweite) ausgesendet. Diese Laserstrahlen treffen dann auf Umgebungsobjekte im Rangierbereich (zum Beispiel Wagen), an denen sie reflektiert werden. Diese Reflexionen (siehe Abbildung 5) werden als Punkt-Koordinaten erfasst und zu einer Punktwolke zusammengefasst.



Abbildung 5: Reflexionspunkte der Umfoldsensoren auf Objekten in der Unreal Engine. Bild: IFZN

Die Weiterverarbeitung der Punktwolke erfolgt dann klassisch über Bodenfilter, Clustering und Bounding-Boxen-Generierung bis zur Erstellung der Objektliste (vergleiche [3]). Da für die Umfelderkennung nur Punkte auf Objekten relevant sind, werden im ersten Schritt alle Bodenpunkte aus der Punktwolke entfernt. Das Programm detektiert nun die einzelnen Objekte. Hierfür wird ein Clustering-Algorithmus verwendet, der Punkte anhand ihres euklidischen Abstands zu Gruppen zusammenfasst. Jede Gruppe repräsentiert eine Objektinstanz. Für die Steuerung ist es wichtig, dass die Objekte in schnell zu berechnenden geometrischen Formen vorliegen. Aus diesem Grund wandelt der Bounding-Box-Algorithmus die Punktgruppen in Quader um. Im letzten Schritt werden die einzelnen erkannten Objekte zu einer Objektliste zusammengefasst.

Speziell bei der Umsetzung von Sensorik in der Infrastruktur gilt es, den Rechenaufwand auf Grund der hohen Anzahl von notwendigen Sensoren zu reduzieren, da ansonsten die Ausführungszeiten für die Durchführung von einzelnen Szenarien zu hoch werden würde. Dazu werden zwei Maßnahmen implementiert. Zum einen werden beim Aufbau von Szenarien in Unreal Engine zwei Umgebungsobjekttypen unterschieden. Objekte, die von der Sensorik erkannt werden sollen (zum Beispiel Wagen, Menschen, größere Hindernisse) bilden die erste Kategorie. Sie treten mit Sensoren, in deren Reichweite sie sich befinden, in Interaktion. Es werden entsprechend dem Erfassungsbereich und der Auflösung des Sensors Reflexionen an diesen Objekten berechnet und objektzugehörige Bounding-Boxen erzeugt. Da der Unreal Engine der Objekttyp (zum Beispiel Mensch) bekannt ist, kann den Objekten zusätzlich die Klassifikation zugeordnet werden. Objekte, die von der Sensorik nicht erkannt werden müssen (zum Beispiel Gras, Gebüsch ...), bilden die zweite Kategorie. Diese Objekte treten mit den Sensoren nicht in Interaktion, das heißt, es werden keine Reflexionspunkte mit der Sensorik erzeugt. Sie sind damit wie durchsichtig für den Sensor. Dadurch kann der Rechenaufwand massiv reduziert werden, auch wenn dies der Datenverarbeitung in der realen Rangierumgebung nicht entspricht. Eine zweite Maßnahme zur Reduktion des Rechenaufwands besteht darin, dass nur Daten von Sensoren im Fahrwegbereich eines automatisierten Zuges zur Weiterverarbeitung herangezogen werden. Sensoren, die einen Bereiche der Rangierumgebung erfassen, in denen der Zug der aktuell simulierten Rangieraufgabe nicht unterwegs ist, liefern daher auch keine Daten. Auch diese Maßnahme trägt dazu bei den Rechenaufwand auf ein angemessenes Maß zu reduzieren.

Simulationsumgebung MATLAB/Simulink (Track Side Management System)

In MATLAB/Simulink ist das TSMS einschließlich des Perzeptionsmoduls und der ADCU implementiert (siehe Abbildung 6). Das Logistiksystem stellt aus dem Rangierauftrag den Fahrwegverlauf und die Zugkonstellation zur Verfügung. Der Fahrweg wird als Pfad für die Bewegung des Zuges an die Unreal Engine weitergegeben, die die physikalische Simulation der Umgebung übernimmt. Das TSMS verarbeitet die von der Unreal Engine übermittelte Objektliste zusammen mit der aktuellen Lokposition, um Objekte im Fahrweg des Zuges zu identifizieren und darauf basierend Steueranweisungen für die Lokomotive zu generieren. Die berechnete Lokgeschwindigkeit wird anschließend an die Unreal Engine zurückgesendet, um die Bewegung des Zuges in der virtuellen Umgebung anzupassen.

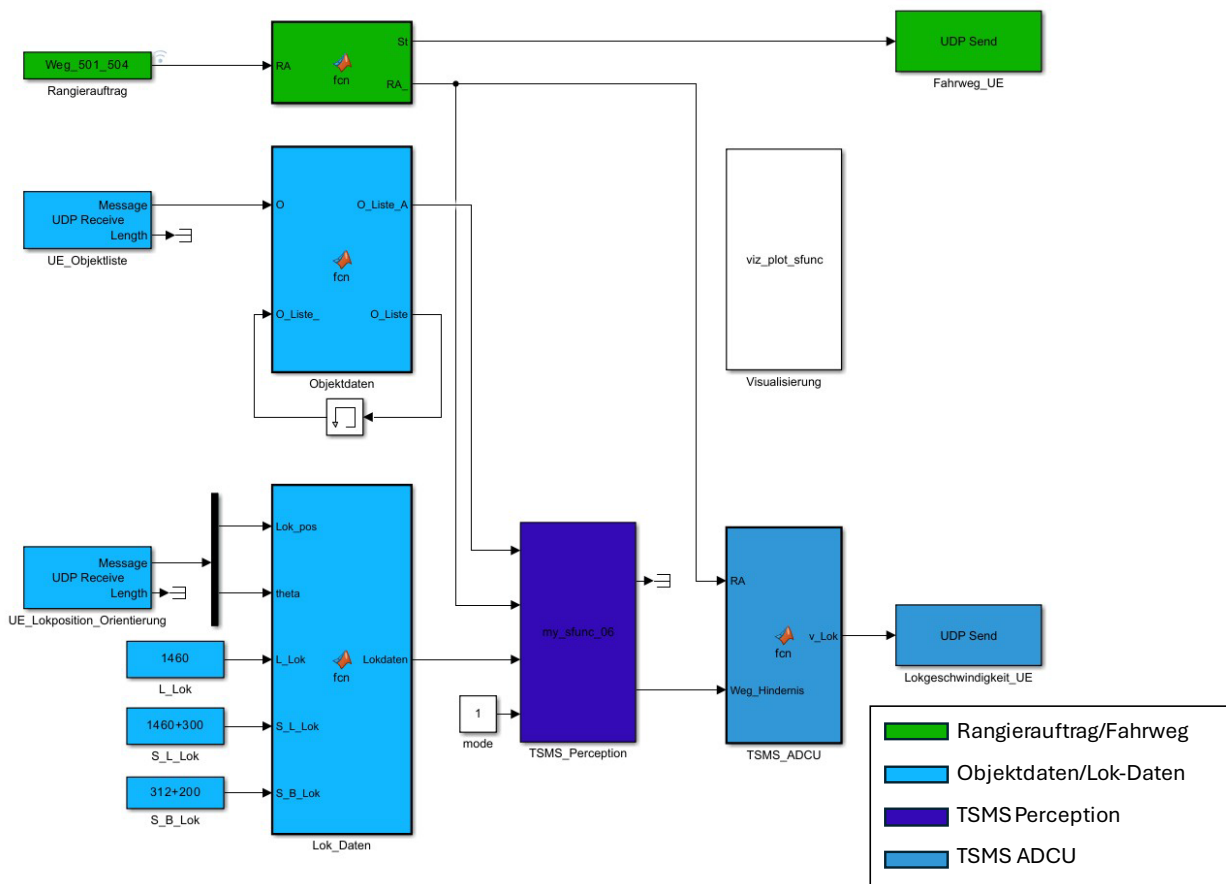


Abbildung 6: Simulationsumgebung MATLAB/Simulink. Bild: IFZN

Im Perzeptionsmodul des TSMS erfolgt die Identifikation von Hindernissen im Fahrweg des Zuges. Grundlage dieser Auswertung sind der Fahrwegverlauf und die Zugkonstellation aus dem Logistiksystem sowie die Objektlisten und die Lokposition aus der Unreal Engine. Aus den Fahrweginformationen wird eine virtuelle Karte des Fahrwegs erstellt, in die sowohl die aktuelle Zugposition als auch die erkannten Objekte eingetragen werden (siehe Abbildung 7). Das Modul ist dadurch in der Lage, potenzielle Kollisionen vorherzusagen. Wird eine Kollision im Fahrweg detektiert, so kann der verbleibende Weg von der Zugspitze bis zum Hindernis bestimmt werden.

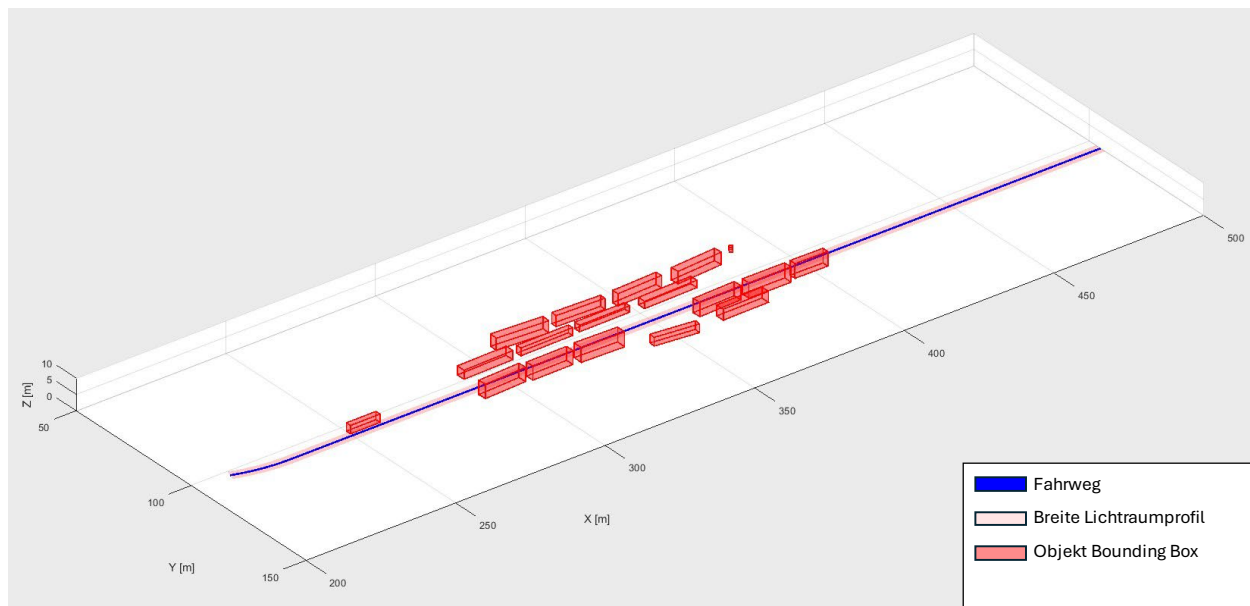


Abbildung 7: Virtuelle Karte inklusive erkannter Objekte im Perzeptionsmodul von MATLAB/Simulink. Bild: IFZN

Die ADCU entnimmt dem Rangierauftrag die zulässige Geschwindigkeit für den aktuellen Streckenabschnitt, die auszuführende Aktionen, wie das Ansetzen an einen Wagen, und die Entfernung zum Ziel. Auf dieser Grundlage berechnet sie die erforderlichen Steueranweisungen (Beschleunigen/Bremsen) für die Lokomotive und übermittelt diese an die Unreal Engine, um die Bewegung des Zuges in der Simulation anzupassen. Erkennt das Perzeptionsmodul ein Hindernis im Fahrweg, liefert es die ermittelte Distanz zum Objekt an die ADCU. Diese nutzt die Distanz, um den notwendigen Anhalteweg zu berechnen, sodass der Zug mit ausreichendem Sicherheitsabstand vor dem Hindernis zum Stillstand gebracht werden kann.

Im Rahmen des Projektes konnte so ein vollständiger Simulationsworkflow entwickelt werden, der mit vergleichsweise geringem Aufwand detaillierte Untersuchungen verschiedenster Rangierszenarien hinsichtlich der Umfelderkennung mit Infrastruktursensorik ermöglicht.

4.6. Ausblick

Der erfolgreiche Aufbau der Simulationsumgebung und die Konzeption der Automatisierungsarchitekturen bilden die methodischen und technischen Grundlagen für die weiterführende Forschung und die prototypische Umsetzung der nächsten Projektphase. Die folgenden Schritte konzentrieren sich auf die systematische Analyse der Leistungsfähigkeit und Robustheit der entwickelten Konzepte sowie die detaillierte Definition der notwendigen Steuerungs- und Sicherheitslogik.

Im nächsten Schritt sollen komplexe und sicherheitskritische Szenarien simuliert werden, um die Potenziale und Grenzen von infrastrukturbasierten Umfeldwahrnehmungskonzepten systematisch zu analysieren. Das Hauptziel ist es herauszufinden, in welchen Situationen die Nutzung von Infrastruktursensorik deutliche Vorteile bietet – etwa bei verdeckten Sichtbereichen, langen Bremswegen oder komplexen Gleisgeometrien – und wo ihre Grenzen liegen. Geplant sind hierfür detaillierte Testszenarien wie Objekte oder Personen im Gleis, Fahrten auf Gleisbögen neben einem Zug auf dem Nachbargleis, Personen, die zwischen Wagen hervortreten können, sowie Kombinationen diesen Situationen mit erschwerten Sichtbedingungen, etwa nach Tunneln oder Unterführungen. Diese Szenarien sollen nicht nur die Robustheit der Sensorik, sondern auch die Reaktionsfähigkeit des Gesamtsystems in Echtzeit prüfen. Parallel dazu sollen die Ergebnisse mit alternativen Konzepten wie einer rein fahrzeugseitigen Sensorik verglichen werden, um die jeweiligen Stärken und Schwächen unter realitätsnahen Bedingungen zu bewerten. Ergänzend werden Performance-Analysen durchgeführt, um die Skalierbarkeit der Simulationsumgebung zu bewerten. Dabei wird ermittelt, wie viele Sensoren mit hoher Auflösung gleichzeitig Daten liefern können, ohne die Echtzeitfähigkeit der Auswertung zu beeinträchtigen. Darüber hinaus wird die Simulationsumgebung um zusätzliche Sensortypen wie Kamera und Radar erweitert, um Multisensor-Fusionsstrategien zu untersuchen und

deren Einfluss auf Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu bewerten. Außerdem ist die Steuerungs- und Sicherheitslogik zu präzisieren. Hierzu ist die Entwicklung eines detaillierten Datenfusionsalgorithmus notwendig, der im Perzeptionsmodul die von der Lok und der Infrastruktur ermittelten Hindernisdistanzen sicher und in Echtzeit zusammenführt. Eng damit verbunden ist die Ausarbeitung des funktionalen Sicherheitskonzepts und der Redundanzstrategie, um die strengen Anforderungen an die Versagenswahrscheinlichkeit zu erfüllen und das Systemverhalten bei möglichen Teilausfällen der Sensorik präzise festzulegen. Um das Ziel einer modularen und nachrüstbaren Automatisierungsarchitektur zu erreichen, muss zudem die praktische Integration in die existierenden Lokomotiven adressiert werden. Angesichts des hohen Durchschnittsalters der Rangierflotte (zum Beispiel der DB-Cargo-Flotte von circa 42 Jahren) muss untersucht werden, welche standardisierten oder nachrüstbaren Schnittstellen und Aktuatoren erforderlich sind, um die generierten Steuerbefehle mit minimalem Aufwand in die Steuerung der Bestandsflotte zu integrieren und somit dem wirtschaftlichen Ziel des Projekts gerecht zu werden.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Das Vorlaufforschungsprojekt TrackVision hat die methodischen und technischen Grundlagen für eine Automatisierungsarchitektur im Rangierbetrieb erfolgreich geschaffen. Ausgehend von den definierten Projektzielen konnten alle Kernpunkte erreicht werden. Die Analyse bestehender Automatisierungskonzepte und die Ableitung spezifischer Anforderungen für den Rangierbetrieb bilden die Basis für die entwickelten Architekturvarianten. Drei Konzepte wurden konzipiert und hinsichtlich Reichweite, Kosten und Integrationsaufwand bewertet. Die hybride Architektur erwies sich als besonders leistungsfähig, da sie den größten Wahrnehmungshorizont und die höchste Robustheit gegenüber schwierigen Sichtbedingungen bietet. Parallel dazu wurde eine fotorealistische Simulationsumgebung auf Basis der Unreal Engine realisiert und mit MATLAB/Simulink gekoppelt. Diese Umgebung ermöglicht die reproduzierbare Untersuchung komplexer Rangierszenarien unter variablen Umweltbedingungen und stellt damit ein zentrales Werkzeug für die weitere Forschung dar. Erste Tests zeigen, dass die entwickelten Konzepte grundsätzlich geeignet sind, die Automatisierung im Rangierbetrieb sicher und effizient umzusetzen.

Die Nachhaltigkeit des Projekts wird durch die langfristige Nutzung der entwickelten Simulationsumgebung gewährleistet. Sie dient nicht nur als Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten, sondern wird auch in der Lehre eingesetzt, beispielsweise in den Modulen „Fahrzeugelektronik und -software“ sowie „Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren“ der Studiengänge Maschinenbau und Fahrzeugtechnik. Darüber hinaus sind die Ergebnisse von TrackVision in eine Projektskizze für die Ausschreibung der Förderung von Forschungsprojekten an Hochschulen für Angewandte Wissenschaften (HAW-ForschungsAkzente) eingeflossen, die die prototypische Umsetzung einer ganzheitlichen Automatisierungsarchitektur vorsieht. In enger Zusammenarbeit mit Industrie- und Netzwerkpartnerinnen und -partnern soll ein simulationsbasierter Demonstrator entstehen, der die Umsetzbarkeit der Konzepte in unterschiedlichen Anwendungsszenarien wie Hafenanlagen, Werksbahnen und klassischen Rangierbahnhöfen zeigt. Damit liefert das Projekt nicht nur den technologischen Rahmen für eine schrittweise Automatisierung des Rangierbetriebs, sondern auch eine fundierte Entscheidungsgrundlage für eine breite Implementierung in Deutschland. Im Rahmen des Projekts wurden zudem mehrere wissenschaftliche Arbeiten betreut. Dazu gehören die abgeschlossenen Bachelorarbeiten „Analyse der Schnittstellen eines ATO-Systems“ von Benedikt Fischer sowie „Integration von Infrastruktursensorik in eine virtuelle Simulationsumgebung zum Test automatisierter Rangierlokomotiven“ von Benjamin Schwarz. Eine weitere Arbeit zur Entwicklung einer Methodik für die effiziente Integration von Infrastruktursensorik in virtuelle Testumgebungen wird derzeit von Oleksandr Romanov bearbeitet. Die Ergebnisse des Projekts sollen 2026 in einer Fachzeitschrift sowie als Konferenzbeitrag veröffentlicht werden.

Das Projekt TrackVision hat damit einen entscheidenden Schritt hin zu einer sicheren, effizienten und nachhaltigen Automatisierung des Rangierbetriebs geleistet. Die erarbeiteten Konzepte und Werkzeuge bilden die Grundlage für die nächste Entwicklungsphase und tragen dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit des Schienengüterverkehrs langfristig zu sichern.

6. Literatur

- [1] Allianz pro Schiene: Verkehrsverlagerung - Mehr Güter auf die Schiene (14.05.2024) <https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/gueterverkehr/verlagerung/>.
- [2] Bundesregierung: So funktioniert der Schienenverkehr (14.05.2024) <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/faq-schienenverkehr-2170596>.
- [3] Falgenhauer, R., Dösch, M., Singer, C. & Cichon, M. (2024): Herausforderungen und Lösungsansätze für die Umfelderkennung von automatisierten Rangierlokomotiven. In: Tagungsband zur 20. Internationalen Schienenfahrzeugtechniktagung Dresden vom 18.- 20. 09.2024.
- [4] Geischberger, J., Falgenhauer, R., Sinnemann, J., Hanisch, R., Grunwald, A. & Cichon, M. (2024): JadeWeserPort: Ergebnisse des Projektes RangierTerminal4.0. In: IE – DER EISENBAHNINGENIEUR, Ausgabe 7/2024.
- [5] Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F. & Singer, C. (2016): Handbook of Driver Assistance Systems. Springer International Publishing, Schweiz.
- [6] Pagenkopf, J., Böhm, M., Jäger, V. & Konrad, M. (2022): Kernergebnisse der Machbarkeitsanalyse alternativer Antriebe im Einsatzgebiet von Rangierloks in Deutschland. NOW GmbH, Berlin.
- [7] Tiedemann, J. (2024): Fahrer:innen gesucht - Die Fachkräftesituation in Verkehrs- und Logistikberufen. Studie im Rahmen des Projektes Kompetenzzentrum Fachkräftesicherung (KOFA) in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Köln.
- [8] DIN EN 62290: Bahnanwendungen – Betriebsleit- und Zugsicherungssysteme für den städtischen schienengebundenen Personennahverkehr – Teil 1 (IEC 62290-1).
- [9] Deutsche Bahn AG (2025): Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2024, Berlin, April 2025.
- [10] Suwalski, I. & Wünsche, H. (2021): ATO over ETCS als Schlüssel für mehr Effizienz, Kapazität und Nachhaltigkeit – Erfahrungen und Strategien aus der Praxis, Signal + Draht (113), 9/2021.
- [11] Digitale Schiene Deutschland: Fahrzeugautomatisierung. (02.05.2025) <https://digitale-schiene-deutschland.de/Automatic-Train-Operation>.
- [12] Bayerischer Rundfunk (BR): Die fahrerlose U-Bahn in Nürnberg. (02.05.2025) <https://www.br.de/nachricht/mittelfranken/inhalt/hintergrund-fahrerlose-u-bahn-nuernberg-100.html>.
- [13] Digitale Schiene Deutschland: Sensors4Rail testet erstmals sensorbasierte Wahrnehmungssysteme im Bahnbetrieb. <https://digitale-schiene-deutschland.de/Sensors4Rail> (02.05.2025).
- [14] Digitale Schiene Deutschland: Hochautomatisiertes Fahren im Raum Stuttgart. (02.05.2025) <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/Hochautomatisiertes-Fahren-DKS#tab-Projektdateien>.
- [15] Digitale Schiene Deutschland: AutomatedTrain. (02.05.2025) <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/automatedtrain>.
- [16] Reichmann, M., Wagner, A. & Himmelbauer, G. (2025): Potenziale der Grades of Automation im Rangierbetrieb. EI – Der Eisenbahningenieur. 5/2025. Seite 67-71.
- [17] SAMIRA – Rail Shunting System: <https://samira-rangier-assistent.de/de-de> (02.05.2025)

- [18] DB Cargo – Für die Zugbildung der Zukunft. (29.04.2025)
<https://www.dbcargo.com/rail-de-de/logistik-news/db-cargo-val-automatisierung-13328956>.
- [19] VDE V 0826-20:2023-09 Überwachungsanlagen - Teil 20: Externe Perimeter-Sicherungsanlagen – Anwendungsregeln, 2023.
- [20] RaDaR 4.0 - Rail Data Reconnaissance. (02.05.2025)
<https://www.digitest-hafen.de/project/radar4-0/>.
- [21] DB Cargo: Mit Kamerabrücken in die Zukunft. (02.05.2025)
<https://www.dbcargo.com/rail-de-de/logistik-news/mit-kamerabruecken-in-die-zukunft-9971368>.
- [22] Kreyenberg, D., Narayanan, H., Renner, T., Nitzschke, H. & Wenzel, B. (2024): Digitales Register – die „Single Source of Truth“ für Infrastrukturdaten für das vollautomatisierte Fahren. SIGNAL+DRAHT, Ausgabe 06/2024.
- [23] UIC: FRMCS – Future Railway Mobile Communication System. (05.05.2025)
<https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs>.
- [24] DIN EN 50239: Bahnanwendungen – Funkfernsteuerung von Triebfahrzeugen für Rangierbetrieb, 2018.
- [25] DAC4EU: Digitale Automatische Kupplung im Schienengüterverkehr. (05.05.2025)
<https://www.dac4.eu/>.
- [26] Shift2Rail – X2Rail-4 – D5.1 GoA3/4 Specification, 2023.
- [27] Europäische Kommission – TSI Loc&Pas, L 222/88, 2023.
- [28] Polz, J., Mihm, P. & Czurda, W. (2003): Automatisches Fahren (AF) – Lastenheft „Hinderniserkennung Fahrweg“.
- [29] Johannes Golling, „Bremsweg und Bremszeit,“ 2019. (28.07.2025)
<https://www.bahntechnik-bahnbetrieb.de/bremsweg-und-bremszeit/>.
- [30] Epic Games: Unreal Engine Documentation. <https://docs.unrealengine.com/> (24.11.2025).
- [31] MathWorks: MATLAB and Simulink Documentation. <https://www.mathworks.com/help/> (24.11.25).

BELLU – Bordnetze in der elektrischen Luftfahrt

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wagner

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

Elias Berschneider, M. Eng.

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

Zusammenfassung:

Im Projekt „BELLU“ wurden Simulationsmodelle elektrischer Gleichstrombordnetze erstellt, wie sie in elektrisch betriebenen Flugzeugen genutzt werden sollen. Diese Modelle bestehen unter anderem aus Komponentenmodellen von Batterien, Gleichspannungs-(DC-DC-)Wandlern und Brennstoffzellen. Die Modellierungstiefe ist dabei so gewählt, dass typische Simulationen und regelungstechnische Analysen und Optimierungen solcher Bordnetze durchgeführt werden können wie Stabilitätsuntersuchungen von Leistungsfluss-Regelungen mittels sogenannter Droop-Regler, Simulation von Ein- und Ausschaltvorgängen sowie Lastwechsel- und Störszenarien, Unterstützung der Systemauslegung durch Simulationsstudien, beispielsweise zur Dimensionierung der Kapazitäten an den leistungselektronischen Komponenten.

1. Projektdaten

| | |
|------------------------------|--|
| Fördersumme | 35.000 Euro |
| Laufzeit | Januar bis Dezember 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik |
| Projektleitung | Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wagner |
| Projektteam | Elias Berschneider, M. Eng. |
| Kontakt Daten Projektleitung | bernhard.wagner@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

Mit dem auf europäischer Ebene formulierten Ziel, bis zum Jahr 2050 Netto-Null-Kohlendioxid-(CO₂-)Emissionen zu erreichen, steht auch der Luftfahrtsektor vor der Notwendigkeit tiefgreifender technologischer Transformationen. Diese politischen Zielsetzungen werden durch brancheninterne Initiativen wie „Destination 2050“ zusätzlich untermauert und konkretisiert [1]. Neben der Substitution konventioneller fossiler Kraftstoffe durch synthetisch erzeugte, nachhaltig bereitgestellte Flugkraftstoffe (E-Fuels) rücken zunehmend hybridelektrische Antriebskonzepte in den Fokus der Forschung und Entwicklung, da ein erheblicher Anteil der Klimawirkung des Luftverkehrs nicht auf den CO₂-Ausstoß zurückzuführen ist, sondern auf andere Emissionen, insbesondere Stickoxide [2], die sich bei Verbrennungsantrieben nur bedingt vermeiden lassen. Solche Konzepte kombinieren batterieelektrische Energiespeicher mit Brennstoffzellensystemen und bieten damit ein erhebliches Potenzial zur schrittweisen Dekarbonisierung der zivilen Luftfahrt [3].

Für den sicheren und effizienten Betrieb hybridelektrischer Antriebsstränge ist die Entwicklung leistungsfähiger regelungstechnischer Verfahren zur Energie- und Spannungsversorgung zwingend erforderlich. Diese müssen sowohl eine optimale Leistungsflussaufteilung zwischen Batterien und Brennstoffzellen gewährleisten als auch die in der Luftfahrt geltenden strengen Anforderungen hinsichtlich Stabilität, Redundanz und funktionaler Ausfallsicherheit erfüllen. Während in der straßengebundenen Elektromobilität bereits vielfältige Ansätze zur Regelung hybridelektrischer Bordnetze untersucht wurden – beispielsweise modellprädiktive Regelungsstrategien wie in [4] – sind die Anforderungen im Luftfahrtkontext deutlich anspruchsvoller. Gründe hierfür liegen in den erheblich höheren Leistungsniveaus sowie in der Notwendigkeit, mehrere Energiequellen parallel zu betreiben und redundant auszulegen. Zudem müssen luftfahrtspezifische Bordnetze auch in Stör- und Notfallszenarien ohne übergeordnete Kommunikationsinfrastruktur zwischen den Energiequellen stabil bleiben.

Die resultierenden Netzarchitekturen weisen daher eine hohe strukturelle Ähnlichkeit zu elektrisch isolierten Kleinstnetzen im Inselbetrieb auf. In diesem Anwendungsfeld stellen sogenannte „Droop-Regelungen“ derzeit den Stand der Technik dar und haben sich als robuste, verteilte Regelungskonzepte etabliert [5]. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die wissenschaftliche Herausforderung, Droop-basierte Verfahren mit weiterentwickelten, dynamisch optimierenden Regelungsstrategien zu kombinieren, um die besonderen Anforderungen des Luftfahrtsektors erfüllen zu können.

Die Arbeitsgruppe Antriebsregelung der Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik befasst sich mit der Anwendung regelungstechnischer Methoden im Themengebiet der Elektromobilität. Bisherige Schwerpunkte waren die Regelung von Elektroantrieben (für Traktionsmaschinen und Hilfsantriebe) mit Applikationen aus der „rollenden“ und „fliegenden“ Elektromobilität. Die in diesem Projekt adressierte Modellierung zur Stabilitätsbetrachtung von Gleichstrom-Bordnetzen ist für die Arbeitsgruppe ein noch relativ neues, interessantes Forschungsgebiet.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen dieses Projekts sollen grundlegende Simulations- und Regelungsmodelle für ein vereinfachtes elektrisches Bordnetz entwickelt, implementiert und simuliert werden. Dabei ist auf eine geeignete Modellierungstiefe zu achten, so dass die Rechenzeitanforderungen und Simulationsdauern nicht übermäßig steigen.

Das übergeordnete Ziel besteht darin, eine belastbare methodische und technische Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich geregelter elektrischer Bordnetze für elektrisch betriebene Flugzeuge innerhalb der Arbeitsgruppe Antriebsregelung der Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik zu schaffen. Das Projekt soll unterstützen, Förderprojekte beantragen zu können und eine solide Basis zu haben, um eine gezielte Optimierung solcher Bordnetze im Hinblick auf Stabilität, Dämpfung von Netzschwingungen, dynamisches Verhalten, energetische Effizienz sowie Redundanz und Ausfallsicherheit vornehmen zu können.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

4.1. Modellanforderungen

Da ein einziges Modell unmöglich alle Aspekte eines großen Systems abdecken kann, ohne übermäßig rechenintensiv zu werden, wurden zu Beginn die Anforderungen an die Modellierung definiert. Der erste wichtige Aspekt ist die Festlegung des Fokus auf die elektrische Seite des Netzes. Das Thermomanagement spielt gerade bei Leistungselektronik mit ihren hohen Leistungsdichten eine wichtige Rolle, ebenso wie bei Brennstoffzellen die Zufuhr von Luft oder Wasserstoff. Diese Aspekte sollen jedoch nur insoweit betrachtet werden, wie sie für die elektrischen Eigenschaften relevant sind. Weiterhin soll der Fokus auf dem Verhalten des Gesamtsystems liegen.

Auf eine genaue Modellierung des internen Verhaltens von Umrichtern, Wandlern, Batterien et cetera muss – sofern das Verhalten des Gesamtsystems weiterhin korrekt wiedergegeben wird – verzichtet werden. Dies liegt daran, dass die Subkomponenten von verschiedenen Projektpartnern bereitgestellt werden und dementsprechend Informationen zu deren Innenleben in vielen Fällen nicht verfügbar sind. Auf dieser Basis muss auch festgelegt werden, bis zu welcher Genauigkeit das Verhalten des Gesamtnetzes wiedergegeben werden soll.

Die Bandbreite möglicher Modellierungsansätze reicht dabei von einfachen Quellen und Senken, mit denen zumindest Lastflüsse simuliert werden können – ausreichend für die Validierung des Energiemanagements, aber ohne Aussagekraft über das dynamische Verhalten – bis hin zu detaillierten geschalteten Modellen. Hier soll ein Mittelweg gefunden werden. Die erstellten Modelle sollen simpel genug sein, um auch überlagerte Steuerungen simulieren zu können, wofür Simulationshorizonte von etwa einer Stunde notwendig sind. Gleichzeitig sind Simulationen insbesondere für Situationen von Interesse, die mit Hardware nicht getestet werden können oder sollen, da sie beispielsweise zur Beschädigung von Komponenten führen könnten.

Dementsprechend sollen auch häufig auftretende Fragestellungen durch die Modelle abgebildet werden können. Mit der gewünschten Genauigkeit und den angestrebten Simulationshorizonten einhergehend muss zudem die Hardware, auf der die Modelle später verwendet werden, festgelegt werden, da dies die Rechenzeiten erheblich beeinflusst. Hier wurde entschieden, dass die Simulationsmodelle so ausgelegt sein sollen, dass sie auch auf Standardrechnern ausgeführt werden können, ohne zu übermäßig langen Simulationszeiten zu führen.

4.2. Komponenten-Modelle

Im Folgenden sollen die Modelle der Hauptkomponenten, die im Rahmen des Projekts erstellt worden sind, kurz erläutert werden.

4.2.1. DC-DC-Wandler

Für den Einsatz in Flugzeugen spielt die Leistungsdichte der Komponenten eine wichtige Rolle. Daher sind alle Hochspannungs (HV)-Wandler in der Regel nicht isoliert. Als Wandlertopologien kommen üblicherweise Halb- oder Vollbrücken zum Einsatz. Da die Spannungen der Quellen – etwa Brennstoffzellen oder Batterien – meist unter der Busspannung liegen, ergeben sich insbesondere in Fehlerfällen deutliche Unterschiede zwischen den zwei Wandlerstrukturen.

Bei Halbbrücken-Boost-Wandlern kann der Strom nicht mehr durch den Wandler begrenzt werden, sobald die Ausgangsspannung unter die Eingangsspannung fällt. Das stellt vor allem für Batterien ein Risiko dar, da deren Spannung häufig nahe an der Busspannung liegt und dadurch große Kurzschlussströme entstehen können. Da bislang kein allgemeiner Konsens darüber besteht, ob Halb- oder Vollbrücken verwendet werden sollten, wurden für beide Varianten Modelle erstellt.

Für die Modellierung sind einige Vereinfachungen notwendig. Zunächst wird der Schaltvorgang nur im Mittelwert betrachtet. Moderne DC-DC-Wandler arbeiten teilweise mit sehr hohen Schaltfrequenzen bis in den Bereich von 100 kHz. Eine vollständig geschaltete Modellierung wäre für das Gesamtsystem nicht umsetzbar, da der Rechenaufwand gerade in größeren Netzen mit mehreren Quellen stark ansteigen würde. Hinzu kommt, dass eine detaillierte Abbildung des Schaltverhaltens genaue Kenntnisse über den jeweiligen Wandler, wie etwa die Modulationsstrategie, voraussetzen würde – Informationen, die insbesondere bei Komponenten von Projektpartnern meist nicht vollständig vorliegen.

Aus diesen Gründen wird ein sogenanntes State-Space-Averaged-Modell verwendet, das die Mittelwerte der relevanten Zustandsgrößen korrekt abbildet, gleichzeitig aber unabhängig von der Schaltfrequenz bleibt.

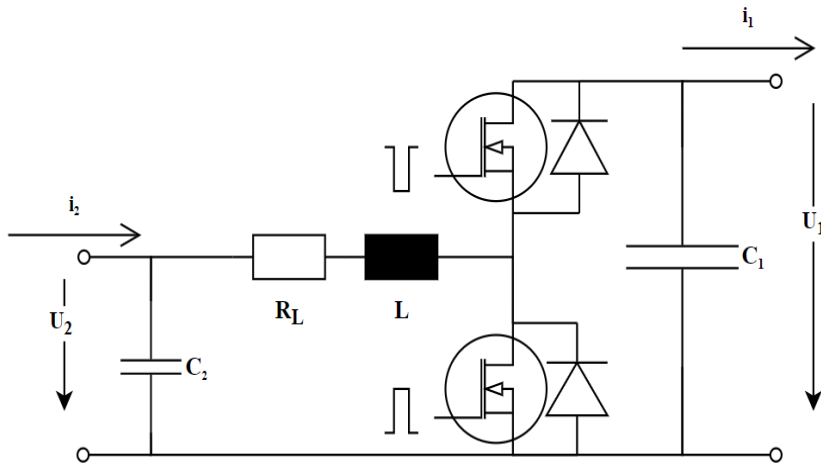


Abbildung 1: Schematische Darstellung DC-DC-Wandler. Quelle: Elias Berschneider

Ein simpler Halbbrücken-DC-DC-Wandler, wie in Abbildung 1 dargestellt, wird durch diese Methode auf die Differentialgleichungen (1) reduziert. Das nichtlineare Verhalten des Wandlers bleibt hierbei jedoch erhalten, wie an der Multiplikation des Duty Cycles D , der sich aus der Regelung ergibt, und den Zustandsgrößen ersichtlich ist.

$$\begin{aligned}
 L \frac{di_L}{dt} &= u_{C2} - R_L i_L - (1 - D) u_{C1} \\
 C_1 \frac{du_{C1}}{dt} &= (1 - D) i_L - i_1 \\
 C_2 \frac{du_{C2}}{dt} &= i_2 - i_L
 \end{aligned} \tag{1}$$

Mit diesem einfachen Modellierungsansatz kann das Verhalten der Wandler im normalen Betrieb bereits abgebildet werden und die Stabilität des Netzes auf Basis solcher Modelle beurteilt werden [6-8]. Es ergeben sich mit dieser Modellierungsart allerdings Einschränkungen hinsichtlich der Betriebsmodi der Wandler. Mit den gezeigten Differentialgleichungen ist der Wandler auf die Betriebsart „Continuous Current Mode“ (CCM) festgelegt; die Schalter sind also im Gegentakt ein- beziehungsweise ausgeschaltet.

Moderne Wandler nutzen aus Effizienzgründen jedoch häufig Betriebsarten mit Zero-Current-Switching, beispielsweise den echten „Bus-Converter-Mode“ (BCM) oder Betriebsbereiche nahe dem „Discontinuous Current Mode“ (DCM), etwa unter Einsatz von Quasi-Resonant- oder Valley-Switching. Diese Verfahren liegen jedoch hinreichend nah am CCM, sodass das gewählte Modell das Verhalten des realen Systems weiterhin in guter Näherung beschreibt.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich dadurch, dass sich mit diesem einfachen Modell nicht beide Schalter gleichzeitig öffnen lassen und die in den Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren (MOSFETs) integrierten Dioden nicht abgebildet werden. Dies führt insbesondere dann zu Abweichungen, wenn der Wandler während der Simulation ein- oder ausgeschaltet wird, wie es beispielsweise bei Vorladevorgängen oder Überspannungsabschaltungen auftritt. Um diese Vorgänge korrekt darzustellen, wird der Wandler mit dem in Abbildung 2 gezeigten Ersatzschaltbild modelliert. Zusätzlich zum Duty Cycle D wird ein binäres Enable-Signal EN eingeführt, das die Werte 0 oder 1 annehmen kann. Bei $EN = 0$ ist der Wandler deaktiviert; ein Stromfluss von der Low-side zur High-side ist dann nur möglich, wenn die High-side-Spannung unter die Low-side-Spannung fällt.

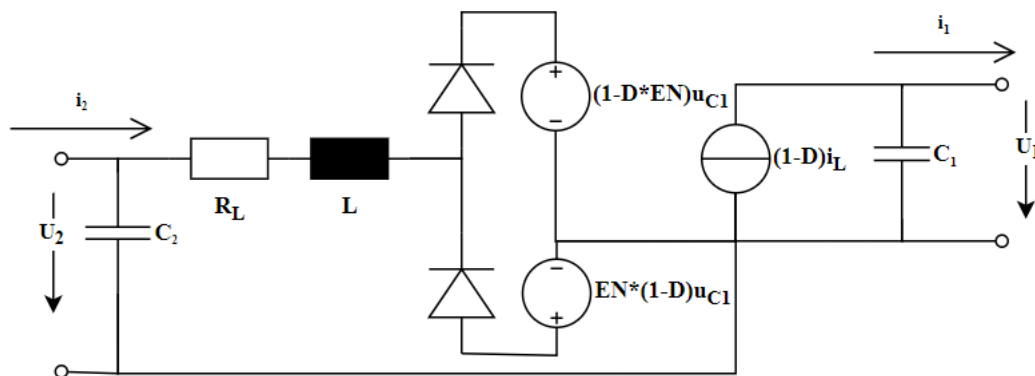


Abbildung 2: Modell abschaltbarer Halbbrücken-DC-DC-Wandler. Quelle: Elias Berschneider

Ein weiterer Punkt ist der Umgang mit mehrphasigen Wandlern. Besonders bei hohen Leistungen wie bei Batterien und Brennstoffzellen werden häufig mehrphasige Wandler verwendet. Im Rahmen dieser Modellierung werden die Phasen nicht einzeln modelliert, da in diesem Genauigkeitsgrad die Aufteilung der Ströme kaum repräsentiert werden kann und zudem auf das Verhalten des Gesamtsystems kaum Einfluss hat. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die Ströme im Mittel symmetrisch zwischen den Phasen aufgeteilt sind. Dementsprechend werden für mehrphasige Wandler die Werte für die Induktivität L und den Drosselwiderstand R_L aus der Parallelschaltung der Phasen gebildet, wie in den nachfolgenden Formeln dargestellt.

$$L_{ges} = \frac{L_{ph}}{n_{ph}}$$

$$R_{L,ges} = \frac{R_{L,ph}}{n_{ph}}$$

Da diese Wandler für verschiedene Zwecke verwendet werden, beispielsweise für Brennstoffzellen oder Batterien, wurden auch unterschiedliche Regelungen in das Modell integriert, die je nach Anwendungsfall ausgewählt werden. Allen gemeinsam ist dabei eine innere Regelschleife für den Spulenstrom. Die Regelungen können sowohl High-side- als auch Low-side-Größen regeln.

Dabei sind folgende Regelungsmodi möglich:

- Spannungsregelung,
- Droop Regelung,
- Leistungsregelung bei gegebener Spannung,
- Stromregelung (für Low-side ohne äußere Schleife).

Bei einem Wechsel zwischen den Regelungsmodi während der Simulation wird der Integrator des Stromreglers vorinitialisiert, um Überspannungen oder Stromimpulse zu vermeiden.

4.2.1.1. Zusatzbeschaltungen

Wie in den Anforderungen definiert, soll das Modell nicht nur den Normalbetrieb, sondern auch häufig auftretende Fehler zumindest näherungsweise abbilden. Ein besonders relevanter Fall sind Überspannungen. In einigen Systemarchitekturen werden die Batteriesysteme aus Gewichtsgründen vergleichsweise klein ausgelegt. Dadurch reicht deren Ladeleistung in der Regel nicht aus, um die volle Leistung der Brennstoffzellen aufzunehmen. Da die Wandler der Brennstoffzellen strom- beziehungsweise leistungsgeführt arbeiten, kommt es bei einem plötzlichen Lastabfall zwangsläufig zu einer Überspannungsabschaltung einzelner Komponenten. Diese kann wiederum nachgelagerte Überspannungen verstärken.

Es muss daher sichergestellt werden, dass solche Ereignisse nicht zur Beschädigung von Netzkomponenten führen. Dies ist insbesondere kritisch, da die häufig gewählte Sollspannung von 850 V relativ nahe an 1000 V liegt, was in mehreren Fällen der maximal zulässigen Isolationsspannung entspricht. Betroffen sind beispielsweise Zwischenkreiskondensatoren oder Silizium-Leistungsbaulemente, die weiterhin in Hilfsaggregaten eingesetzt werden.

Da im Modell ein Average-Ansatz verwendet wird, können Überspannungen, die direkt aus dem Schaltverhalten resultieren, nicht exakt wiedergegeben werden. Diese Effekte müssen daher über geeignete Sicherheitsmargen berücksichtigt werden.

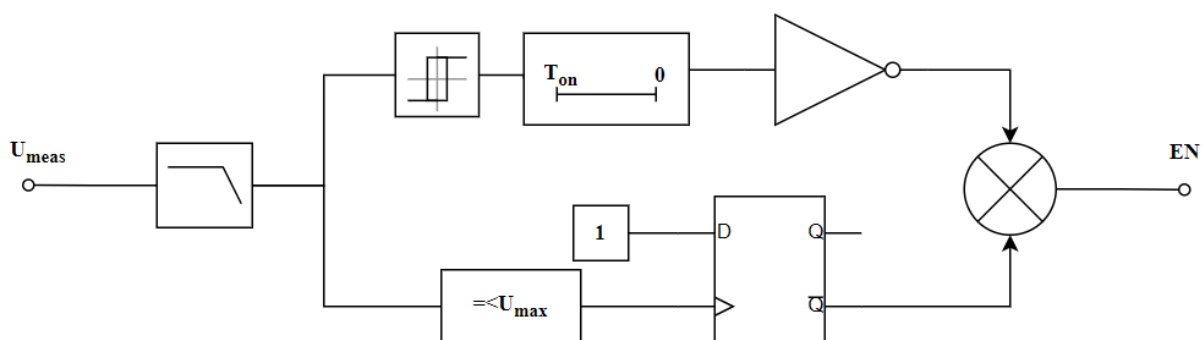


Abbildung 3: Überspannungserkennung. Quelle: Elias Berschneider

Ein Prinzipschaltbild der Überspannungserkennung, wie sie sowohl für High-side als auch Low-side verwendet wird, ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Schaltung besteht aus zwei Zweigen, mit denen Hard- und Softlimits abgebildet werden. Die Softlimits (oberer Zweig) sind veränderbar und erlauben nach einem Abfall der Spannung eine automatische Wiederinbetriebnahme des Wandlers. Im Gegensatz dazu führt das Überschreiten der Hardlimits (unterer Zweig) zu einem Fehlerzustand, der erst durch einen Reset aufgehoben werden kann.

Für die Softlimits wird das gefilterte Messsignal über ein Relais mit Hysterese ausgewertet. Steigt die Spannung über das obere Grenzsinal, schaltet der Relaisausgang auf 1. Bleibt die Spannung länger als die Einschaltverzögerung T_{on} oberhalb der Abschaltsschwelle, wird das Enable-Signal EN auf 0 gesetzt.

Bei einem Überschreiten des Hardlimits wird der invertierte Ausgang des D-Flipflops und damit das Enable-Signal auf null gesetzt. Ein Abfallen der Spannung führt zu keiner Änderung dieses Zustands. Ein Reset ist in diesem Fall zwingend notwendig. Dieses Enable-Signal sperrt nicht nur die Schalter, wie in Abbildung 2 gezeigt, sondern sperrt zudem auch die Eingänge aller Regler. Dies ist notwendig, da andernfalls die Integratoren der Regler weiter integrieren, was dazu führt, dass der Duty Cycle in die Begrenzung 1 oder 0 läuft. Bei einem Wiedereinschalten würde dies zu immensen Stromspitzen führen. Ein Duty Cycle von 1 würde in diesem Modell bedeuten, dass der untere Schalter dauerhaft geschlossen ist, was einem Kurzschluss zwischen Low-side Plus und Minus gleichkommt.

Eine zusätzliche Schutzbeschaltung dient der Erkennung thermischer Überlastung. Diese tritt bei Halbbrücken oder einfachen Boost-Wandlern vor allem bei Kurzschlüssen auf der Hochspannungsseite auf, wenn der Strom durch die in den MOSFETs integrierten Dioden nicht mehr begrenzt werden kann. In realen Wandlern werden verschiedene Temperaturmessungen (zum Beispiel Busbar, Zwischenkreiskondensatoren, Drosseln, MOSFET-Junctions) erfasst, die sich unterschiedlich erwärmen und jeweils eigene Schwellen zur Leistungsreduzierung besitzen. Aufgrund der abstrahierten Modellierung können diese Temperaturverläufe nicht vollständig nachgebildet werden. Da thermische Probleme überwiegend bei Kurzschlüssen entstehen, wird angenommen, dass die Junction-Temperatur des High-side-Transistors maßgeblich für die Abregelung ist.

Eine Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass im Kurzschlussfall bei mehrphasigen Wandlern keine symmetrische Stromaufteilung zwischen den Phasen zu erwarten ist. Die Situation entspricht einer Parallelschaltung mehrerer Dioden, bei der niedrige Widerstände und Fertigungstoleranzen zu deutlichen Unsymmetrien führen können. Das Modell dieser thermischen Betrachtung ist in Abbildung 4 dargestellt. Im Normalbetrieb wird davon ausgegangen, dass die Ströme zwischen den Phasen symmetrisch aufgeteilt sind. Daher wird der Strom durch den High-side-Transistor, der im Wandlermodell in Abbildung 1 dem in C_1 fließenden Strom entspricht, für die Berechnung der thermischen Last durch die Anzahl der Phasen geteilt. Sobald die High-side-Spannung unter die Summe aus Low-side-Spannung und Dioden-Schwellspannung fällt, wird dieser Strom mit einem Faktor c multipliziert, der zwischen 0 und 1 liegt. $c = 1$ bedeutet vollständiger Stromfluss durch den betrachteten Transistor, $c = 0$ gar keinen Stromfluss.

Aus diesem Strom wird mittels eines als konstant angenommenen Widerstands die Verlustleistung bestimmt. Dies ist eine Vereinfachung, da der On-Widerstand unabhängig vom Schaltzustand angenommen wird. Zudem werden Schaltverluste vernachlässigt, was bei Zero-Current-Switching eine hinreichend gute Annäherung darstellt. Die berechnete Verlustleistung wird einer thermischen Kapazität zugeführt, die über einen konstanten thermischen Widerstand an eine konstante Umgebungstemperatur gekoppelt ist. Überschreitet die Temperatur der Kapazität C_{th} den Grenzwert T_{max} , wird der Faktor a über einen definierten Temperaturbereich von 1 auf 0 abgesenkt. Die Breite dieses Bereichs wird durch den Parameter Slope festgelegt. Ein Wert von 10 bedeutet beispielsweise, dass a über einen Temperaturanstieg von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ vollständig von 1 auf 0 reduziert wird.

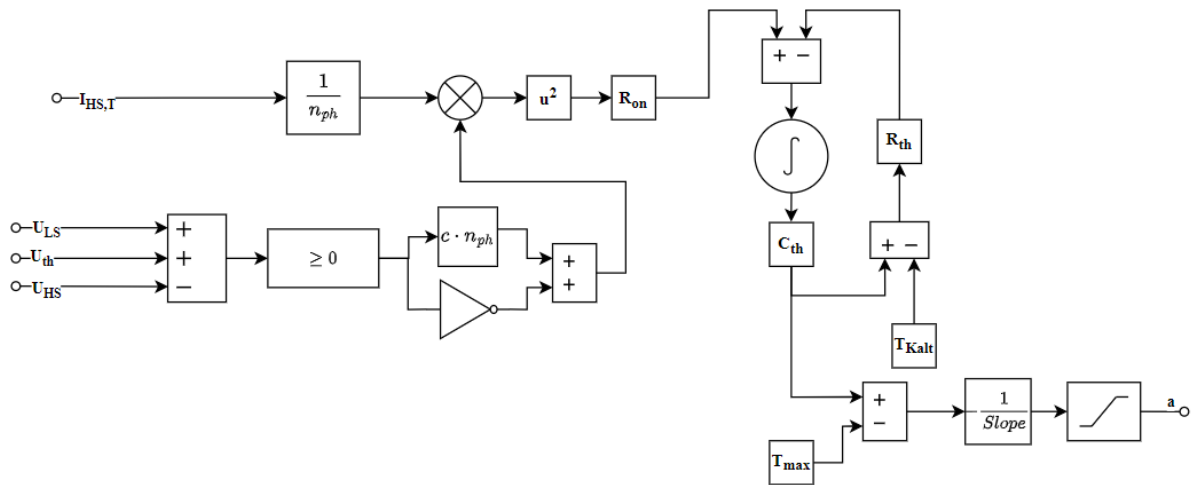


Abbildung 4: Detektion thermische Überlast. Quelle: Elias Berschneider

Der Faktor a wird innerhalb des Modells anschließend mit den Strombegrenzungen der Stromregelschleife multipliziert. Damit wird das thermische Derating des Wandlers abgebildet.

4.2.2. Lasten

Der zweite Aspekt, der das Verhalten des HV-Busses bestimmt, sind die Lasten. In einem großen Flugzeugbordnetz gibt es eine Reihe unterschiedlicher Lasten, beispielsweise Kompressoren, Stellventile oder Wandler für die Niederspannungsversorgung und Umrichter für die Antriebsmaschinen. Allen gemeinsam ist jedoch, dass es sich um leistungselektronische Lasten handelt. Dies ist relevant, da dies im Gegensatz zu Widerstandslasten zu Stabilitätsproblemen führen kann.

Bei Umrichtern wird häufig die Drehzahl geregelt. Ist das geforderte Drehmoment durch die Anwendung vorgegeben, ergibt sich auf der Eingangsseite eine nahezu konstante Leistungsaufnahme, zumindest innerhalb eines bestimmten Spannungsbereichs. Idealerweise verhält sich der Umrichter damit wie eine Konstantleistungslast. Sinkt die Netzspannung, steigt der Strom entsprechend an, wodurch Spannungseinbrüche weiter verstärkt werden. Dies wirkt sich negativ auf die Stabilität des Gesamtsystems aus.

Die Modellierung der Lasten kann deshalb vereinfacht werden. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Verbraucher, die häufig extern bezogen werden, ist eine detaillierte Abbildung mit der gleichen Genauigkeit wie bei den DC-DC-Wandlern üblicherweise nicht möglich. Das für das Netz ungünstigste Verhalten entspricht einer idealen Konstantleistungslast. Wenn keine weiteren Informationen über das Verhalten einer Last vorliegen, kann diese Näherung zur Abschätzung des Worst Case herangezogen werden.

Für große Lasten, beispielsweise den Antriebsumrichter, kann diese Annahme allerdings stark konservativ ausfallen. Die Bandbreite der Stromregelung eines realen Umrichters – die maßgeblich die aufgenommene Eingangsleistung bestimmt – liegt selten über 1 kHz. Diese Begrenzung wirkt sich deutlich auf die resultierenden Zeitkonstanten aus. Für eine ideale Konstantleistungslast parallel zu einem Kondensator ergibt sich bei der Spannung U_0 die folgende Zeitkonstante:

$$\tau_0 = -\frac{CU_0^2}{P}$$

Für eine bandbegrenzte Konstantleistungslast mit Filterzeitkonstante τ_f um den Arbeitspunkt U_0 linearisiert ergibt sich die Differentialgleichung zu nachfolgender Form.

$$\tau_f \dot{\hat{i}} + \hat{i} = -\frac{P}{U_0^2} \hat{u}$$

$$C \dot{\hat{u}} = -\hat{i}$$

Durch Elimination von \hat{i} ergibt die Differentialgleichung 2. Ordnung und daraus das charakteristische Polynom zu:

$$\begin{aligned}\tau_f C \ddot{\hat{u}} + C \dot{\hat{u}} - \frac{P}{U_0^2} \hat{u} &= 0 \\ s^2 + \frac{1}{\tau_f} s - \frac{P}{U_0^2 C \tau_f} &= 0\end{aligned}$$

Die Nullstellen des charakteristischen Polynoms liegen damit bei:

$$-\frac{1}{\tau_{1,2}} = s_{1,2} = -\frac{1}{2\tau_f} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\tau_f^2} + \frac{4P}{U_0^2 C \tau_f}}$$

Daraus ergibt sich ein positiver und somit instabiler Pol sowie ein negativer und damit stabiler Pol. Anhand eines Beispiels basierend auf den Daten eines realen Antriebsumrichters wird deutlich, dass diese Bandbegrenzung den instabilen Pol der Konstantleistungslast deutlich verschiebt.

$$U_0 = 825V$$

$$C = 800\mu F$$

$$P = 1MW$$

$$\tau_f = \frac{1}{2\pi 1kHz}$$

Ohne Filter:

$$\tau_0 = -\frac{800\mu F 825V^2}{1MW} \approx -0,545ms$$

Mit Filter:

$$\begin{aligned}s_{\pm} &= -\frac{1}{2\tau_f} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{\tau_f^2} + \frac{4 \cdot 1MW}{825V^2 \cdot 800\mu F \tau_f}} \approx 1,485kHz \\ \rightarrow \tau_+ &= -\frac{1}{s_+} \approx -0,673ms \\ \frac{\tau_+}{\tau_0} &\sim 1,23\end{aligned}$$

Die Begrenzung der Bandbreite der Last kann den instabilen Pol zwar nicht vollständig stabilisieren, verlangsamt dessen Dynamik jedoch deutlich. Im gezeigten Beispiel entspricht diese Bandbreitenbegrenzung einer effektiven Erhöhung der Eingangskapazität um etwa 25 Prozent im Vergleich zu einer idealen Konstantleistungslast. Eine solche scheinbare Kapazitätserhöhung kann die Stabilität des Netzes spürbar verbessern.

Gerade in der Luftfahrt, wo Bauraum und Gewicht stark begrenzt sind und die Kapazitäten daher möglichst klein und leicht ausgelegt werden, stellt dieser Effekt einen wichtigen Einflussfaktor dar. Aus diesem Grund wird der beschriebene Zusammenhang in das Modell integriert, auch wenn keine vollständige Modellierung der Umrichter oder anderer leistungselektronischer Lasten erfolgt.

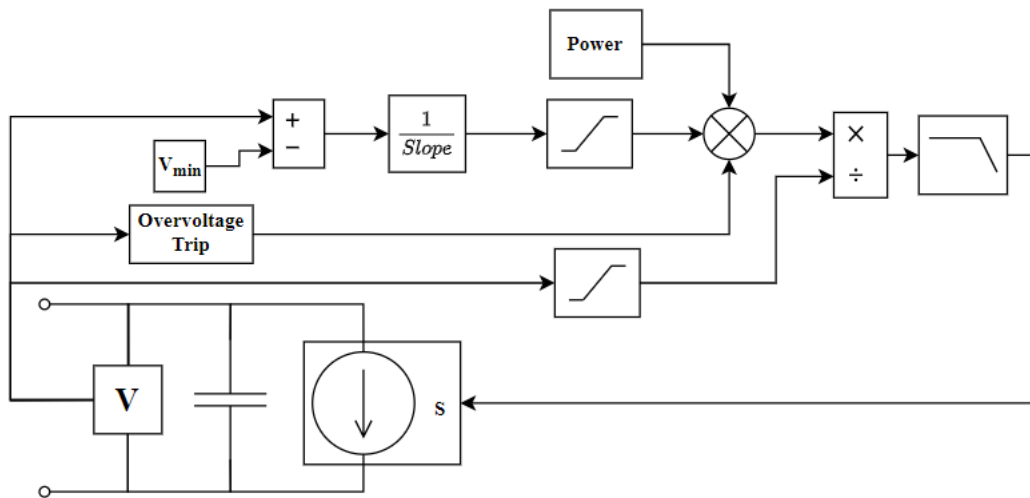


Abbildung 5: Prinzipschaltbild des Lastmodells. Quelle: Elias Berschneider

In Abbildung 5 ist die Prinzipschaltung des Lastmodells gezeigt. Im Grunde besteht es aus dem Eingangskondensator mit einer parallelgeschalteten gesteuerten Stromquelle. Der Strom wird aus der Division des Lastsollwerts durch die Spannung berechnet. Um eventuelle Divisionen durch Null zu vermeiden, wird der Spannungsmesswert über einen Begrenzer geführt. Der Begrenzer verbessert dabei nur die numerische Stabilität. Die Grenzwerte haben keinen Einfluss auf das Verhalten an den Klemmen der Last, solange die Untergrenze unter V_{\min} und die Obergrenze über der Thresholdspannung der Überspannungsabschaltung liegt.

Der so gebildete Stromsollwert wird über ein Tiefpassfilter, das die Bandbreite des Regelkreises der Last approximiert, an die Stromquelle weitergegeben. Ähnlich zu den DC-DC-Wandlern befindet sich in dem Lastmodell eine Zusatzbeschaltung integriert, um das Verhalten außerhalb des normalen Betriebs abzubilden. Es findet sich wieder eine Überspannungsabschaltung, die im Wesentlichen wie bei den DC-DC-Wandler-Modellen realisiert ist. Die Unterspannungsabschaltung hingegen unterscheidet sich insofern, dass kein hartes Abschalten stattfindet, sondern die Leistung über einen gewissen Spannungsbereich reduziert wird. In der Abbildung ist diese Funktion durch den Pfad über dem Overvoltage Trip dargestellt. Hier wird von der gemessenen Spannung V_{\min} , was der Spannung entspricht, bei der die Leistung auf null reduziert wird, subtrahiert. Das Ergebnis wird anschließend durch eine „Slope“ geteilt, die dem Delta (oder der Differenz) aus der niedrigsten Spannung, bei der die Leistung nicht reduziert werden soll, und V_{\min} entspricht.

4.2.3. Brennstoffzellen-Modell

Für die Modellierung von Brennstoffzellensystemen konnte auf ein bereits vorhandenes Modell aus einer studentischen Arbeit, die in Kooperation mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) am Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (Fraunhofer IISB) betreut worden ist, zurückgegriffen werden. Dieses wiederum basiert auf einem Modell aus einer Simulink-Bibliothek. Das Simulink-Modell simuliert bereits die internen Vorgänge der Brennstoffzelle und gibt Strom und Spannung auf Basis der Nernst-Gleichung aus. Dies wird ergänzt durch Teile der Balance of Plant, wie in Abbildung 6 gezeigt. Diese werden von einer Fuel Cell Control Unit gesteuert, die wie die Wandler mit der überlagerten Netzsteuerung kommuniziert.

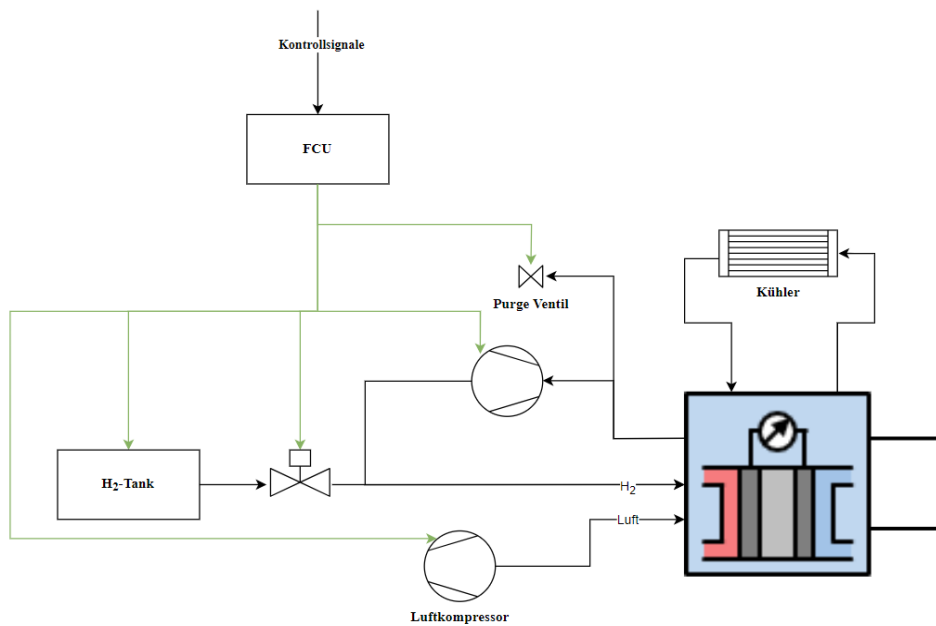


Abbildung 6: Brennstoffzellenmodell Übersicht. Quelle: Elias Berschneider

Dieses Modell wurde im Wesentlichen angepasst, um Kompatibilität mit den übrigen Komponentenmodellen herzustellen und die Performance zu verbessern.

4.2.4. Batteriemodell

Die HV-Batteriestacks, die vor allem zur Stabilisierung des Netzes dienen, indem sie schnelle Lastspitzen abfedern, bestehen, wie in Elektroautos, immer aus mehreren Modulen, die wiederum aus einzelnen Zellen bestehen, um die geforderte Spannung und den geforderten Energieinhalt zu erreichen.

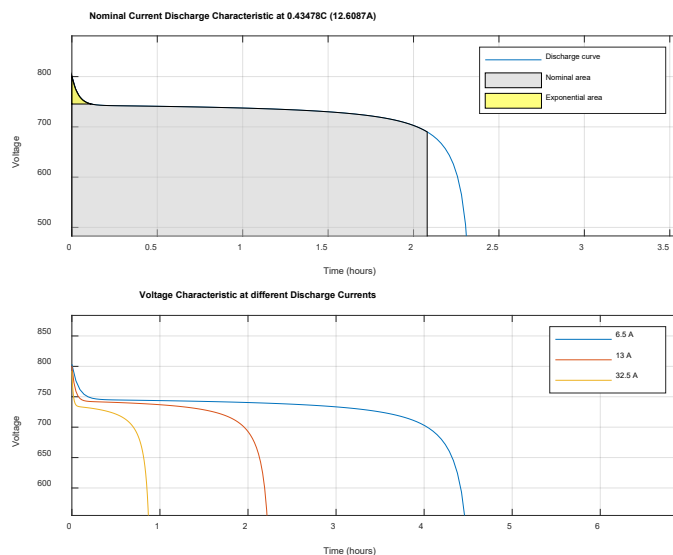


Abbildung 7: Kennlinien des Modells der Batterie des Testsystems. Quelle: Elias Berschneider

Das interne Verhalten dieser Stacks, beispielsweise das Balancing zwischen den einzelnen Zellen oder die Stromaufteilung zwischen den Modulen, ist vor allem die Aufgabe des Battery-Management-Systems. Im Rahmen dieser Modellierung soll vor allem das Verhalten des Gesamtsystems abgebildet werden. Effekte auf Modul- oder sogar werden nicht betrachtet.

Dementsprechend werden die HV-Batterien als ein Gesamtsystem modelliert und es wird davon ausgegangen, dass sich der Gesamt-Stack wie eine einzelne Zelle verhält. Von in Simulink integrierten Bibliotheken werden bereits Modelle bereitgestellt, die die Spannungs-zu-Ladezustand (U/SOC)-Kennlinien von üblichen Batterien gut abbilden. Auf Basis von Datenblättern der Zellen oder Module kann damit extrapoliert das Verhalten des Gesamt-Stacks abgebildet werden. Für die Batterie des Testsystems ergibt sich damit eine Kennlinie wie in Abbildung 7 dargestellt.

4.3. Testnetz

Zum Test der Modelle wurde ein bekanntes Testnetz mit den vorher dargestellten Komponenten nachgebildet. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 8 gezeigt.

Das Testnetz besteht auf der Lastseite aus einer HV-Batterie mit einem in Reihe geschalteten Halbrücken-Boost-Wandler. Die Verbindung zwischen Batterie und Wandler kann dabei über ein Schütz getrennt werden. Der Batterie-DC-DC-Wandler ist im normalen Betrieb Droop-geregelt mit einer Referenzspannung von 825 V für den HV-Bus. Zusätzlich zur HV-Batterie befindet sich auf der Quellseite ein Brennstoffzellensystem. In das System sind bereits die Balance-of-Plant-Komponenten und ein DC-DC-Wandler integriert. Die überlagerte Steuerung Power Management Control Unit (PMCU) kommuniziert daher nur mit dem Fuel Cell System (FCS) und gibt im laufenden Betrieb Leistungswerte an die Systemkomponenten. Der interne DC-DC-Wandler ist leistungsgeregelt. Da er jedoch nicht in der Lage ist, die Brennstoffzellenspannung vollständig auf die 825 V des HV-Busses zu bringen, ist ein weiterer, nachgeschalteter DC-DC-Wandler vorgesehen, der die Spannung weiter boostet. Dieser ist spannungsgeregelt auf die Spannung zwischen den DC-DC-Stufen.

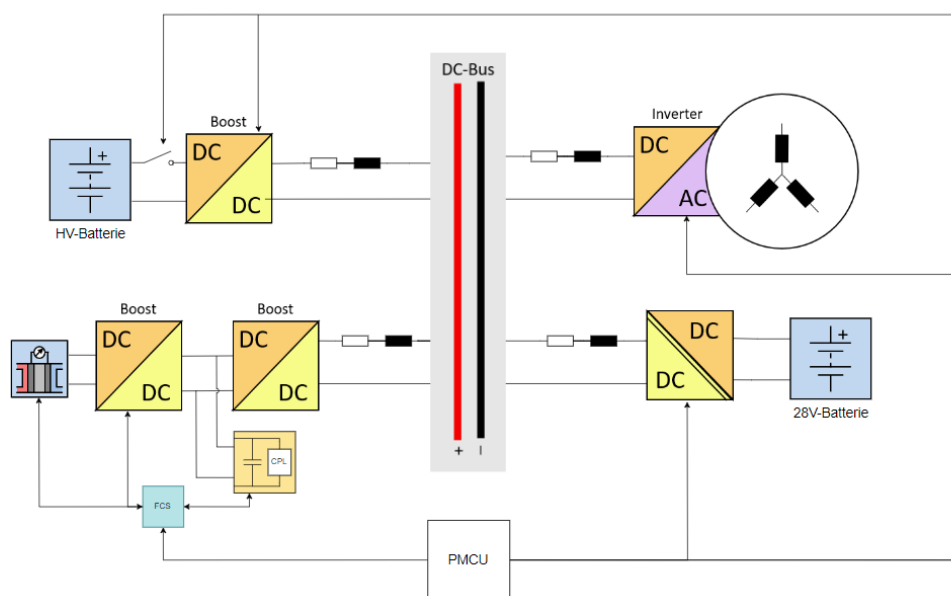


Abbildung 8: Schematische Darstellung des modellierten Netzes. Quelle: Elias Berschneider

Der Batterie-DC-DC und der Brennstoffzellen-DC-DC sind dann mit einem zentralen Bus verbunden. Auf der anderen Seite des Busses ist die 28-V-Niederspannungsbatterie (LV-Batterie) über einen isolierten Vollbrücken-Wandler angeschlossen. Im Simulationsmodell wird dieser Wandler durch eine nichtisolierte Vollbrücke repräsentiert. Im normalen Betrieb wird über diesen DC-DC die Hilfsspannung für die Subsysteme bereitgestellt. Während des Einschaltvorgangs wird die LV-Batterie aber auch zu Vorladung des Busses verwendet.

An Lasten ist in diesem System nur eine einzige elektronische Last angeschlossen, die einen Umrichter nachbildet. Gesteuert wird das Gesamtsystem über einen zentralen Controller, der einerseits von den Subsystemen Statusmeldungen und Messwerte erhält und Sollwerte und Konfigurationsdaten zurückgibt. Funktionen, wie Startsequenzen und Lastflusssteuerung beziehungsweise das Energiemanagement, werden ebenfalls von diesem zentralen Controller übernommen. Diese zentralisierte Steuerung wird auch im Modell abgebildet.

Dieses System ist auch am Fraunhofer IISB im Rahmen eines anderen Projekts aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Der Aufbau des Brennstoffzellensystems ist in Abbildung 9 gezeigt. Aufgrund von Verzögerungen mit dem Testaufbau wurde auch die Parametrierung und Validierung der Modelle verzögert. Die Parametrierung und Validierung der Modelle ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen.



Abbildung 9: Brennstoffzellensystem des Testaufbaus. Quelle: Markus Meindl/Fraunhofer IISB

4.4. Simulationen

Im Folgenden soll anhand der Simulation des Vorladevorgangs (der Precharge-Sequenz) des Netzes gezeigt werden, wie die Teilmodelle mit einer zentralen Steuerung interagieren und auch komplexere Vorgänge wie das Starten von Wandlern oder das Wechseln von Regelgrößen im Betrieb abgebildet werden kann. Dabei werden nacheinander die Kapazitäten aufgeladen und Komponenten in Betrieb genommen. Eine Skizze der Schrittkette, wie sie von der PMCU ausgeführt wird, ist Abbildung 10 dargestellt. Sie beginnt mit der Ladung der HV-Buskapazität durch den 28-V-DC-DC. Dieser wird dazu auf die Busspannung Droop geregelt, die Begrenzung der Ströme erfolgt über eine Begrenzung des Drosselstroms. Die Verläufe wichtiger Messgrößen und Kontrollsignale sind in Abbildung 11 gezeigt.

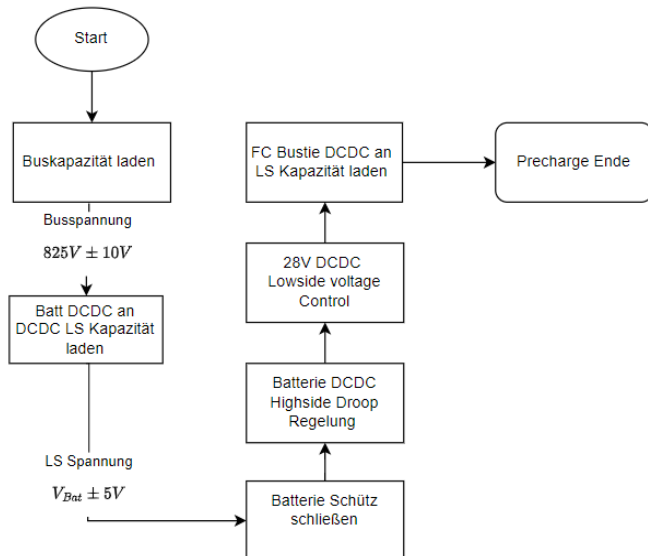


Abbildung 10: Schrittkette des Vorlade-Vorgangs. Quelle: Elias Berschneider

Zu Beginn der Precharge-Sequenz steigt der Strom durch den 28-V-DCDC schnell auf die Begrenzung an und sinkt dann mit dem Anstieg der Busspannung ab. Sobald die Busspannung den Sollwert von 825 V in etwa erreicht hat, beginnt mit einer leichten Verzögerung das Vorladen der Lowside (LS)-Kapazität des Batterie-DC-DC, was sich durch ein Absinken der Busspannung bemerkbar macht. Sobald diese Kapazität geladen ist, wird das Schütz zur Batterie geschlossen und der Batterie-DC-DC-Wandler beginnt, die Busspannung zu regeln. Durch den deutlich geringeren Droop-Widerstand des Batterie-DC-DC-Wandlers fällt der Strom durch den 28-V-DC-DC fast auf null.

Nach einer kurzen Verzögerung beginnt das Vorladen des Brennstoffzellen-Wandlers. Der 28-V-DC-DC-Wandler beginnt in etwa zeitgleich damit, auf der 28-V-Seite die Spannung zu regeln.

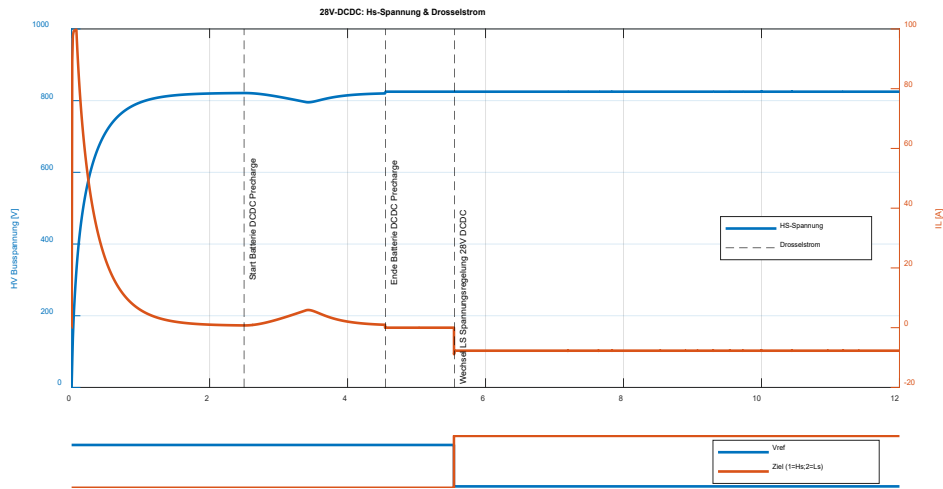
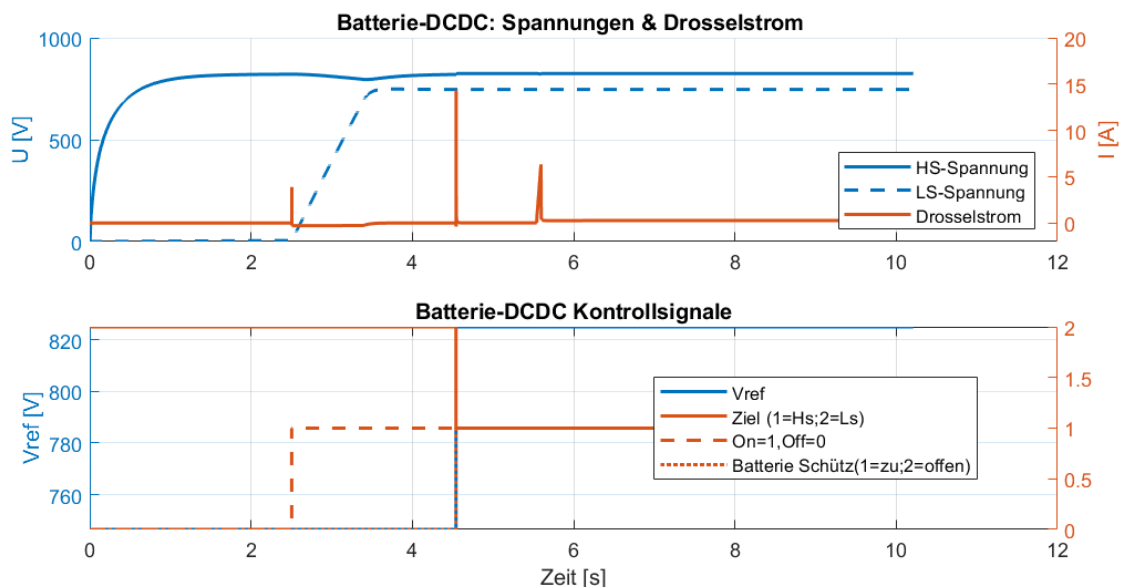


Abbildung 12: Verhalten des 28-V-DC-DC während der Vorlade-Sequenz. Quelle: Elias Berschneider

Im Verlauf der Steuersignale des Batterie-DC-DCs ist zu sehen, dass dieser erst eingeschaltet wird, wenn die Busspannung auf den Sollwert aufgeladen ist. Wie Abbildung 12 zeigt, steigt die Spannung an der Low-side-Kapazität des Batterie-Wandlers im Gegensatz zur Busspannung während des Vorladens annähernd linear an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wandler den Spulenstrom regeln anstatt den Ausgangstrom. Wie ebenfalls zu erkennen ist, verursacht der Übergang von der Low-side-Spannungsregelung zur High-side-Regelung einen kurzen Stromimpuls, der die Erhöhung der Busspannung aufgrund des



geringeren Droopwiderstands zur Folge hat. Im Stromverlauf ist durch einen kleinen Anstieg des Stroms auch zu erkennen, dass die Leistung zum Laden der 28-V-Batterie durch die HV-Batterie bereitgestellt wird.

4.5. Fazit

In diesem Kapitel wurde dargestellt, dass die erstellten Anlagen-, Regelungs- und Steuerungs-Modelle geeignet sind, den Betrieb von Bordnetzen, wie sie für Elektroflugzeuge zum Einsatz kommen sollen, nachzubilden. Dies konnte anhand von Notabschaltungs- und Vorlade-Szenarien exemplarisch gezeigt werden, ebenso bei der Stabilitätsbetrachtungen der elektrischen Bordnetze mit Konstantleistungs-Lasten.

Aktuelle Arbeiten befassen sich mit der Simulation des Betriebs eines konkreten, im Labor des Fraunhofer IISB vorhandenen, Testnetzes (Demo-Bordnetz), das kurz vorgestellt wurde, um die erstellten Modelle für diese Beispielapplikation anpassen, parametrieren, verfeinern und verifizieren zu können. Darüber hinaus kommen die Modelle bereits in weiterführenden wissenschaftlichen Untersuchungen und Entwicklung von Methoden im Kontext des optimierten Betriebs elektrischer Flugzeug-Bordnetze zum Einsatz.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen des Vorlaufforschungsprojekts BELLU wurde eine Sammlung von Komponenten- und darauf aufbauend System-Modellen für die Simulation elektrischer Bordnetze erstellt, wobei der Fokus insbesondere auf typischen Applikationen im Bereich des elektrischen Fliegens liegt. Die Arbeitsgruppe Antriebsregelung ist dadurch in die Lage versetzt, in aufbauenden Forschungsprojekten interessante Fragestellungen zu bearbeiten, wie beispielsweise folgende:

- Stabilitätsanalyse in Gleichspannungs-Bordnetzen, speziell mit Fokus auf typischerweise wirksame Konstantleistungs-Lasten, die in solchen Netzen, wie oben kurz gezeigt wurde, unter gewissen Umständen zu einer Destabilisierung des elektrischen Bordnetzes führen können.
- Unterstützung der Systemauslegung und Dimensionierung vor allem passiver elektrischer Komponenten (Induktivitäten und Kapazitäten) mittels Simulationsstudien. Dies ist von großer Wichtigkeit beim Einsatz in Elektroflugzeugen, da dort besonders hohe Anforderungen in Hinblick auf geringen Bauraum und Gewicht existieren.
- Entwicklung und Software-in-the-loop-Verifikation neuartiger Steuerungs- und Regelungsstrategien zur optimierten Lastflussregelung in redundant ausgelegten (Flugzeug-)Bordnetzen. Dabei steht eine optimierte Koordination der beteiligten Komponenten, beispielsweise mehrere Batterien oder Brennstoffzellen, im Vordergrund.

Die Nutzung und Weiterentwicklung der erstellten Simulationsmodelle ist in bereits laufenden sowie in zu beantragenden, öffentlich geförderten Forschungsprojekten vorgesehen. Diese werden insbesondere in Kooperation mit der Leistungselektronik-Gruppe des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Systeme und Bauelemente-Technologie (IISB) in Erlangen durchgeführt.

Während der Projektlaufzeit dieser Vorlaufforschung konnten einige Simulationsmodelle schon für die Entwicklung und wissenschaftliche Untersuchung einer neuen Methode zur Ladungs-Gleichstellung („State of Charge Balancing“) mehrerer Batterien in einem elektrischen Flugzeug-Bordnetz mit einer Brennstoffzelle und Konstantleistungslast erfolgreich genutzt werden. Erste Ergebnisse wurden bereits in [9] veröffentlicht.

Außerdem wurden während der Projektlaufzeit zwei Vorträge gehalten über das Themengebiet der Stabilitätsuntersuchung elektrischer Gleichstrom-Bordnetze, und zwar ein Vortrag beim „efi-Fachkolloquium“ der Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik (efi) der TH Nürnberg sowie ein Vortrag beim zweimal jährlich stattfindenden WiKe³ (wissenschaftliches Kolloquium für elektrische Energietechnik und Leistungselektronik).

6. Literatur

- [1] Destination 2050 – A route to net zero European aviation Destination2050_Report.pdf (aufgerufen: 28.11.2025).
- [2] DLR Klimawirkung des Luftverkehrs Ein Drittel CO₂- und zwei Drittel Nicht-CO₂-Effekte (aufgerufen: 28.11.2025).
- [3] Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report.pdf (aufgerufen: 28.11.2025).
- [4] Zheng, H., Wu, J., Wu, W. & Wang, Y. (2020): "Integrated Motion and Powertrain Predictive Control of Intelligent Fuel Cell/Battery Hybrid Vehicles," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 5, pp. 3397-3406, May 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2956209.
- [5] Al-Ismail, F. S. (2024): "A Critical Review on DC Microgrids Voltage Control and Power Management," in IEEE Access, vol. 12, pp. 30345-30361, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3369609.
- [6] Li, Z., Pei, W., Ye, H. & Kong, L. (2019): Large signal stability analysis for DC microgrid under droop control based on mixed potential theory. The Journal of Engineering, 2019: 1189-1193. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8574>.
- [7] Chang, F., Cui, X., Wang, M., Su, W. & Huang, A. Q. (2020): "Large-Signal Stability Criteria in DC Power Grids With Distributed-Controlled Converters and Constant Power Loads," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 11, no. 6, pp. 5273-5287, Nov. 2020, doi: 10.1109/TSG.2020.2998041.
- [8] Braitor, A.-C., Konstantopoulos, G. & Kadiramanathan, V. (2022): Stability analysis of DC microgrids with CPLs under novel decentralized primary and distributed secondary control, Automatica, Volume 139, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2022.110187>.
- [9] Berschneider, E., Wagner, B. & Meindl, M. (2025): "Centralized SoC Balancing for Batteries with Droop-Controlled DC/DC Converters for Electric Aircraft", batteries, Nov. 2025, doi: 10.3390/batteries11110411.

Virtual Industrial Digitalization Szenarios (VIDS)

Prof. Dr.-Ing. Philipp Gölzer

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Zusammenfassung:

VIDS schafft eine innovative Forschungs- und Lehrplattform, um Digitalisierung und Künstliche Intelligenz (KI) in industriellen Wertschöpfungssystemen realistisch erlebbar zu machen. Durch virtuelle Produktionsszenarien, Internet-der-Dinge-Kommunikation und skalierbare Daten- und KI-Services können neue digitale Lösungen unter Laborbedingungen entwickelt, getestet und bewertet werden. Die Plattform verbindet Simulation, Datenanalyse und KI zu einem ganzheitlichen Ökosystem und ermöglicht organisationsübergreifende Zusammenarbeit. VIDS stärkt damit Forschung, Lehre und Transfer und bildet die Basis für zukünftige Kooperationen und Weiterentwicklungen.

1. Projektdaten

| | |
|-----------------------------|--|
| Fördersumme | 35.000 Euro |
| Laufzeit | Februar bis Dezember 2025 |
| Fakultät/Einrichtung | Maschinenbau und Versorgungstechnik |
| Projektleitung | Prof. Dr.-Ing. Philipp Gölzer |
| Projektteam | Das Projekt wird und wurde maßgeblich durch studentische Hilfskräfte, Masterarbeiten und Projektarbeiten getragen: <ul style="list-style-type: none">• Pascal Baumann (Master Maschinenbau, Ohm)• Sayedmahdi Mirtavoosi (Master Industrial Engineering und Management, Ohm)• Sakthivel Sundarasan (Master Maschinenbau, Ohm)• Julius Pfeiffer (Master Industrial Engineering und Management, Ohm)• Farzad Jokari (Master Industrial Engineering und Management, Ohm)• Pulkit Mehta (Master Data Science, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg (FAU)) |
| Kontaktdaten/Projektleitung | philipp.goelzer@th-nuernberg.de |

2. Ausgangslage

Die Digitalisierung ist eine der wichtigsten Triebkräfte für Innovation, betriebliche Effizienz und Geschäftsentwicklung. Industrie, Handel und Logistik unternehmen heute große Anstrengungen die Digitalisierung voranzutreiben, um ihre operativen Prozesse zu verbessern und damit die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. In diesem Bestreben spielen die operativen Daten aus den Unternehmensprozessen eine zentrale Rolle, sie sind die Grundlage der Digitalisierung. Die darauf aufbauenden Anwendungen der Künstlichen Intelligenz (KI) basieren auf leistungsfähigen Algorithmen des maschinellen Lernens (ML), mit deren Hilfe große Mengen historischer Daten analysiert und daraus Modelle zur Entscheidungsunterstützung gewonnen werden. Dazu gehören zum Beispiel Anwendungen zur Nachfrageplanung, Durchlaufzeitprognose oder Qualitätskontrolle. Bisher ist es üblich, die Algorithmen mit verfügbaren historischen Daten der betrachteten Prozesse zu trainieren. Auf diese Weise wird eine KI in die Lage versetzt, auf Ereignisse und Szenarien zu reagieren, die bereits aus der Vergangenheit bekannt sind.

Vor dem Hintergrund eines volatilen Unternehmensumfelds durch technologische Entwicklungen, Marktveränderungen, wirtschaftliche Schwankungen, politische Entscheidungen oder Naturkatastrophen entstehen neue Anforderungen an Digitalisierung und KI-Anwendungen, die vielmehr die Betrachtung zukünftiger Entwicklungen und Szenarien in industriellen Wertschöpfungsketten erfordern. Dazu gehören zum Beispiel Fragestellungen des Risikomanagements und Resilienz, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit globaler Lieferketten oder Nachhaltigkeit und Kohlenstoffdioxid-(CO₂-)Emission, die durch politische Regularien in den Fokus rücken. Die Entwicklung von Lösungen für solche Fragestellungen stellt Industrie und Forschung vor die Herausforderung, sich intensiver mit zukünftigen Wertschöpfungs-systemen und Lieferketten sowie deren Digitalisierungsszenarien zu beschäftigen. Zu den Komponenten eines Digitalisierungsszenarios gehören dabei unterschiedliche komplementäre Konzepte und Technologien die als Ganzes betrachtet werden müssen, um deren Funktionsfähigkeit, Wirkung und Nutzen auf Ebene eines Gesamtsystems zu evaluieren.

Zu den wesentlichen Konzepten und Technologien eines Digitalisierungsszenarios gehören:

- Abbildung und Beschreibung beteiligter Systeme und deren Kommunikation auf Basis standardisierter Informationsmodelle, zum Beispiel mittels der Asset Administration Shell im Kontext Industrie 4.0.
- Interaktion und Kommunikation der Akteurinnen und Akteure über das Internet der Dinge (IoT), deren Protokollen (zum Beispiel Message Queueing Telemetry Transport (MQTT), Open Platform

Communications Unified Architecture (OPC-UA)) und Interaktionsmechanismen (zum Beispiel Publish/Subscribe).

- Speicherung großer Datenmengen in Big-Data beziehungsweise Data-Lake-Systemen (zum Beispiel NoSQL-Datenbanken) für effiziente Auswertung und Zugriff.
- Entwicklung von KI/ML-Anwendungen zur Entscheidungsunterstützung beziehungsweise Prozessverbesserung und deren Integration in die operativen Prozesse des betrachteten Szenarios.

Insbesondere Forschende an Hochschulen stehen dabei vor vielfältigen Herausforderungen, wenn es darum geht, Lösungen für industrielle Digitalisierungsszenarien zu entwickeln und zu evaluieren:

- Zu der größten Herausforderung zählt unter anderem der Umstand, dass an einer Hochschule keine operativen Systeme, zum Beispiel Produktion und Logistik, existieren, an denen Digitalisierungsszenarien ganzheitlich erforscht, implementiert und evaluiert werden können. Damit haben Forschende auch keinen Zugriff auf operative Daten als Kern und Grundlage für die Entwicklung von Digitalisierungslösungen.
- Öffentliche Datensätze für KI/ML-Entwicklung auf einschlägigen Plattformen wie Kaggle, OpenML oder Datahub.io bieten zwar viele Beispieldatensätze an, um ML-Verfahren und Algorithmen zu entwickeln und zu benchmarken, diese bilden jedoch kaum industrielle Szenarien ab und sind wenig geeignet ganze Digitalisierungsszenarien zu bewerten.
- Sind Datensätze aus Industrieprojekten vorhanden, bilden diese nur bestehende Prozesse und Strukturen ab oder erfüllen oftmals nicht die erforderliche Quantität und/oder Qualität.

Der Fokus von Forschungsaktivitäten liegt deshalb meist auf der isolierten Betrachtung einzelnen Komponenten eines Digitalisierungsszenarios, zum Beispiel der Entwicklung von KI/ML-Anwendungen für spezifische Anwendungsfälle. Das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten in einem Digitalisierungsszenario kann deshalb nur eingeschränkt betrachtet werden. Somit können auch keine Aussagen über Auswirkungen und Nutzen auf Ebene des Gesamtsystems getroffen werden.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen dieser Vorlaufforschung sollen die grundlegenden Informationstechnik-(IT-)technischen Strukturen, Prozesse und Modelle zur Abbildung virtueller Digitalisierungsszenarien für industrielle Wertschöpfungssysteme konzipiert und prototypisch umgesetzt werden. Virtuell bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die operativen physischen Systeme aus Produktion und Logistik durch realitätsnahe Simulationsmodelle ersetzt werden. Zur Anwendung kommt dabei ereignisdiskrete Simulation, die es ermöglicht dynamische und stochastische Prozesse und deren Wechselwirkungen im betrachteten System realitätsnah zu beschreiben. Die Simulationsmodelle agieren als operativer Datenlieferant und Interaktionspartner für die Prozesskette der Digitalisierung. Dies ermöglicht die Erforschung der verschiedenen Fragestellungen und Komponenten eines Digitalisierungsszenarios sowie deren operatives Zusammenspiel und Gesamtsystembetrachtungen, unter Laborbedingungen (siehe Abbildung 1). Die IT-Infrastruktur soll dabei insbesondere eine organisationsübergreifende Forschung und Zusammenarbeit ermöglichen. Simulationsmodelle und KI/ML-Anwendungen verschiedener Organisationen können über das Internet der Dinge gekoppelt werden und so datengetriebene Services im Kontext der Digitalisierung abbilden.

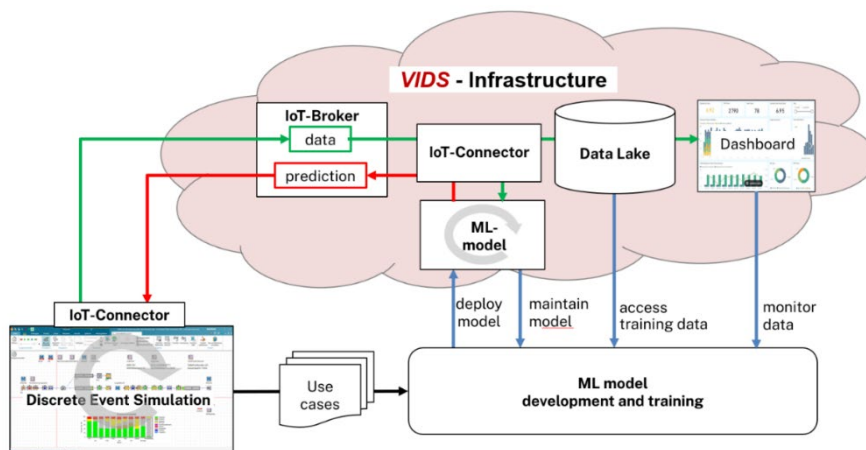


Abbildung 1: Wesentliche VIDS-Komponenten und deren Zusammenspiel. Bild: Eigene Darstellung

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

4.1 Konzeption der IT-Gesamtarchitektur

Zu Beginn des Projekts wurde auf Basis der definierten Zielsetzung eine ganzheitliche IT-Architektur zur Abbildung virtueller Digitalisierungsszenarien entwickelt. Ausgangspunkt war die Analyse der Anforderungen an Datenkommunikation, Datenhaltung, Visualisierung und KI-Integration im Kontext industrieller Wertschöpfungssysteme sowie der angestrebten Kollaborationsszenarien zwischen beteiligten Organisationen. Darüber hinaus wurde besonderer Wert auf Offenheit, Erweiterbarkeit und Interoperabilität gelegt, um eine Forschungs- und Entwicklungsumgebung zu schaffen, die langfristig und projektübergreifend nutzbar ist. Auf dieser Grundlage wurde eine modulare und mehrschichtige Systemarchitektur entworfen, welche die digitale Prozesskette eines realen Industrieszenarios nachbildet.

Die Architektur umfasst alle wesentlichen Komponenten eines Digitalisierungsszenarios:

- **Operatives System**, repräsentiert durch ereignis-diskrete Simulationsmodelle, die als Datenlieferant und Interaktionspartner agieren.
- **IoT-Kommunikation** auf Basis des MQTT-Protokolls und standardisierter Publish/Subscribe-Mechanismen über HiveMQ-MQTT-Broker.
- **Big-Data-Speicherung** in der NoSQL-Datenbank MongoDB.
- **Datenindexierung und Suche** mittels Elasticsearch zur effizienten Analyse großer Datenmengen.
- **Dashboarding** in Grafana zur Visualisierung historischer und aktueller Systemzustände.
- **Integration von KI-/ML-basierten Entscheidungslogiken**, die in Echtzeit auf Simulationsereignisse reagieren können.

Die Architektur ist in Backend-, Frontend- und Application-Programming-Interfaces-(API-)Services unterteilt, die innerhalb einer gemeinsamen Serverumgebung orchestriert werden (siehe Abbildung 2). Die Backend-Schicht stellt Kommunikations- und Datendienste bereit (MQTT-Broker, MongoDB, Elasticsearch). Die Frontend-Schicht umfasst grafische Benutzeroberflächen und datenpublizierende Services wie Grafana und den Comprehensive-Knowledge-Archive-Network-(CKAN)-basierten Data Catalog. Die API-Schicht bündelt externe Zugriffe über ein NGINX-basiertes API-Gateway, das Routing, Authentifizierung und Zugriffskontrolle sicherstellt. Dadurch können externe Systeme wie Simulationsmodelle, Python-basierte KI-Clients oder ML-Entwicklungsumgebungen sicher und standardisiert auf die Infrastruktur zugreifen.

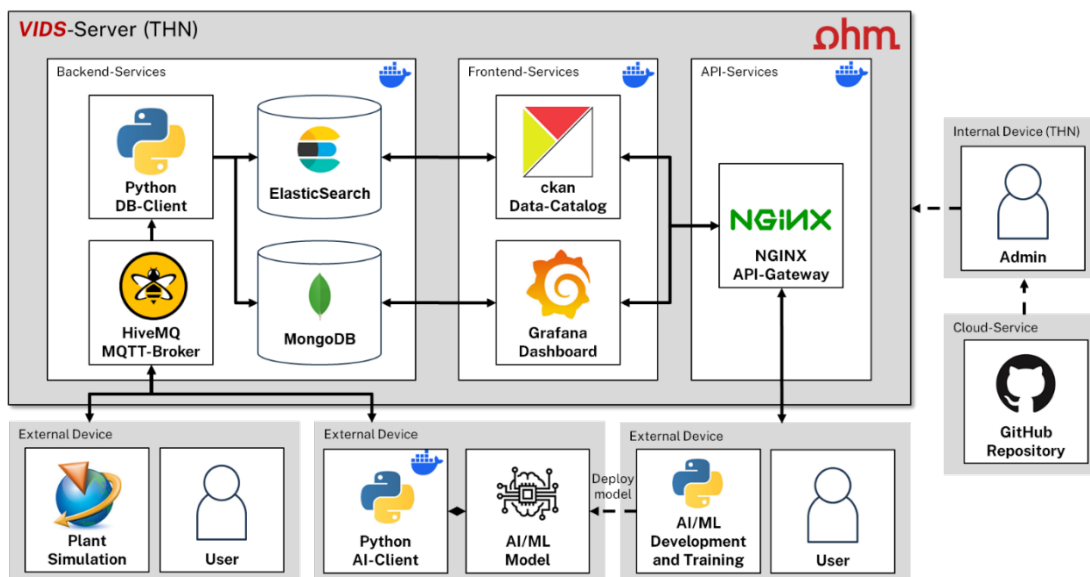


Abbildung 2: IT-Architektur. Bild: Eigene Darstellung

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Unterstützung **organisationsübergreifender Zusammenarbeit**. Die zentrale Datenhaltung im Data Lake ermöglicht Studierenden, Forschenden und externen Projektpartnerinnen und -partnern den Zugriff auf konsistente Datensätze. Die Bereitstellung von Code-Artefakten über GitHub sowie die kapselnde API-Schicht erleichtern die kollaborative Entwicklung und den reproduzierbaren Einsatz von Softwarekomponenten.

Im Rahmen der Systemarchitektur wird zudem der gesamte Lebenszyklus datengetriebener Anwendungen abgebildet: Daten werden im operativen System generiert, über MQTT übertragen, gespeichert und analysiert, anschließend für das Training von KI-Modellen genutzt und schließlich wieder als Entscheidungslogiken in die operative Umgebung zurückgespielt. Dadurch entsteht ein geschlossener digitaler Regelkreis, der das Verhalten realer industrieller Wertschöpfungsprozesse unter Laborbedingungen realitätsnah simuliert.

Die gesamte Architektur wurde als containerisierte Infrastruktur mit Docker Compose umgesetzt, wodurch eine hohe Reproduzierbarkeit, Skalierbarkeit und Betriebssicherheit erreicht werden. Updates und Erweiterungen können ohne Beeinträchtigung anderer Dienste durchgeführt werden. Zudem bildet die Architektur die Grundlage für die langfristige Bereitstellung eines zentralen VIDS-Servers, der künftig von der Zentralen IT der Hochschule für Forschungs- und Lehrprojekte gehostet wird.

4.2 Entwicklung eines AAS-basierten Datenexport-Bausteins für Plant Simulation

Ein zentrales Arbeitspaket war die Entwicklung eines Softwarebausteins für Siemens Plant Simulation, der es ermöglicht, Simulationsdaten im Format der Asset Administration Shell (AAS) über MQTT zu übertragen (siehe Abbildung 3). Die AAS stellt ein standardisiertes Informationsmodell im Kontext Industrie 4.0 dar und dient im Projekt als Datengrundlage für die digitale Abbildung der simulierten Anlagen und Prozesse.

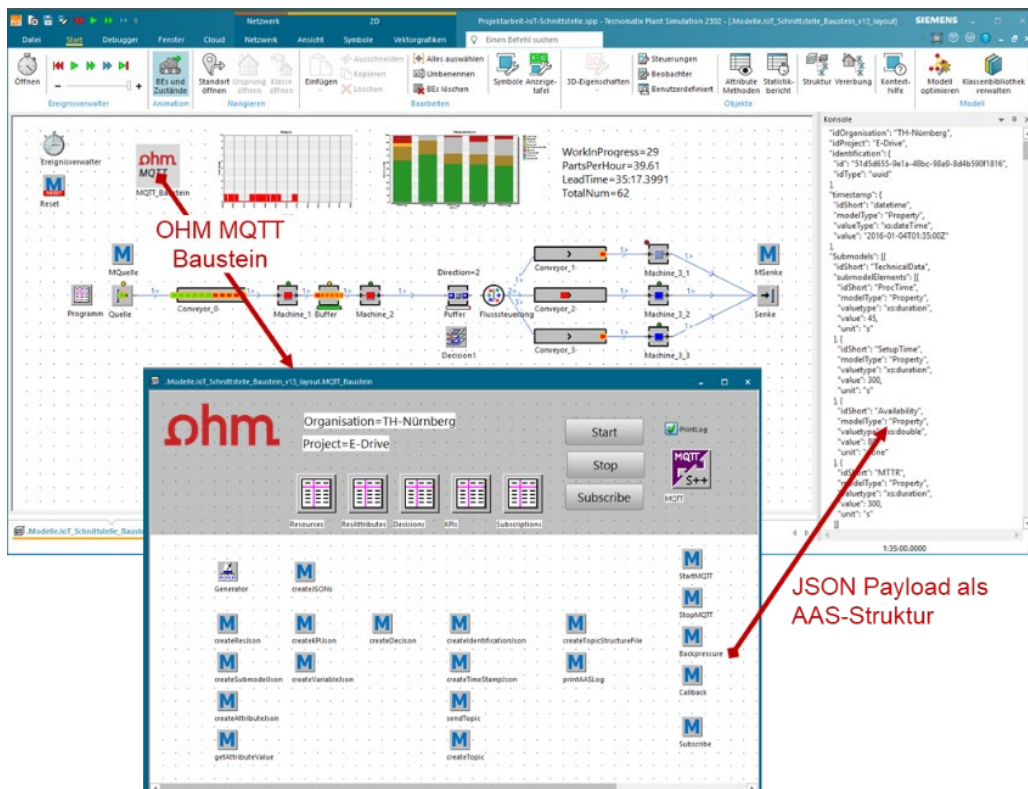


Abbildung 3: Software Plant Simulation mit entwickeltem Baustein OHM MQTT. Bild: Eigene Darstellung

Im Rahmen der Implementierung wurden zunächst die relevanten Simulationsobjekte und deren technische Daten sowie operative Daten identifiziert, die als Datenelemente in Frage kommen. Mittels Tabellen können die gesendeten Submodels und Datenelemente konfiguriert, erweitert oder angepasst werden. Auf Basis der Konfiguration eines jeden Objekttyps (Station, Buffer, Conveyor ...) werden die Daten in ein AAS-

konformes JavaScript-Object-Notation-(JSON-)Format überführt und während der Simulation zyklisch auf dem MQTT-Broker gepublished. Dabei wird jedes Objekt als eigenes Topic abgebildet. Dies ermöglicht einen gezielten Zugriff auf einzelne Objekte und deren Daten mittels Subscribe-Mechanismus. Die Topic-Struktur wurde standardisiert und als Konfigurationsdatei umgesetzt. Aus Seite des Servers wird die Konfigurationsdatei eingelesen und sorgt so für die projektbezogene Speicherung der Daten in MongoDB und Elasticsearch.

Das Ergebnis ist ein wiederverwendbarer, konfigurierbarer Plant-Simulation-Baustein, der als „digitaler Datenlieferant“ fungiert und Simulationsdaten im standardisierten AAS-Format erzeugt und auf dem MQTT-Broker published (siehe Abbildung 3).

4.3 Entwicklung eines DB-Client-Services für die Big-Data-Verarbeitung

Zur Verarbeitung der eingehenden Simulationsdaten wurde ein vollständig asynchroner Python-Dienst entwickelt, der MQTT-Nachrichten empfängt, validiert, transformiert und in MongoDB beziehungsweise Elasticsearch speichert.

Der Service wurde modular aufgebaut und umfasst folgende Kernkomponenten:

- MQTT-Consumer zur hoch performanten Aufnahme der Nachrichten (aiomqtt).
- Payload-Parser zur Strukturierung und Validierung der AAS-Daten.
- Konvertierung von Zeitstempeln und Datenformaten für die Speicherung in MongoDB.
- Batch-basierter MongoDB-Writer zur performanten Dateneinlagerung.
- Backpressure-Mechanismus, der Überlastsituationen erkennt und die Simulationsgeschwindigkeit dynamisch regelt.

Ein wesentliches architektonisches Prinzip besteht darin, dass der Data-Base-(DB-)Client-Services projektbezogen konfigurierbar ist. Über eine dedizierte Konfigurationsdatei lassen sich unter anderem MQTT-Topics, Datenbankziele, Batch-Größen, Backpressure-Parameter und weitere Verarbeitungsschritte flexibel anpassen. Dadurch kann derselbe technische Dienst für unterschiedliche Forschungs- und Anwendungsszenarien wiederverwendet werden, ohne den Code selbst verändern zu müssen.

Auf dem VIDS-Server laufen mehrere Instanzen des DB-Client-Services parallel, jeweils mit eigenen Konfigurationen für spezifische Projekte oder Simulationsmodelle. Dies ermöglicht eine klare funktionale Trennung verschiedener Datenströme, eine einfache Administration sowie eine sichere Isolierung projektbezogener Ressourcen.

Im Ergebnis steht ein flexibles, skalierbares und hoch performantes Datenerfassungssystem zur Verfügung, das sämtliche eingehenden Datenströme stabil verarbeitet und in Echtzeit für Analyse, Dashboarding und KI-Anwendungen bereitstellt.

4.4 Entwicklung eines AI-Client-Services für die Kopplung von KI/ML-Modellen

Zur Abbildung der Interaktion zwischen Simulation und KI/ML-Modellen wurde ein sogenannter Artificial-Intelligence-(AI-)Client-Service entwickelt, der als standardisierte Kommunikationsschnittstelle zur Anbindung externer KI- und ML-Modelle dient. Der Dienst stellt die technische Infrastruktur bereit, um Entscheidungsanforderungen aus der Simulation entgegenzunehmen und diese an inferenzfähige ML-/KI-Modelle weiterzuleiten.

Der AI-Client-Service empfängt über definierte MQTT-Topics sogenannte „Decision Requests“, die während der Simulationslaufzeit durch relevante Prozessereignisse ausgelöst werden. Diese Anfragen werden validiert, strukturiert und an ein extern angebundenes KI/ML-Modell weitergereicht. Die Berechnung von Vorschlägen, Prognosen oder Entscheidungen erfolgt ausschließlich in diesen externen Modellen. Anschließend nimmt der AI-Client-Service die erzeugte Antwort entgegen und publiziert sie als „Decision Response“ zurück an die Simulation. Dadurch entsteht ein standardisierter digitaler Rückkopplungsmechanismus zwischen Simulation und KI-Anwendung.

Das Konzept unterstützt den gesamten Lebenszyklus KI-basierter Anwendungen:

- Entwicklung und Training von ML-/KI-Modellen in separaten Entwicklungsumgebungen.
- Deployment der Modelle in eine Inferenzumgebung (lokal, serverseitig oder extern).
- Austausch und Aktualisierung von Modellen ohne Änderungen am Service selbst.
- Echtzeit-Kopplung der Modelle an operative Simulationsprozesse über MQTT.

Der AI-Client-Service ist vollständig projektbezogen konfigurierbar. Modelle, Topics, Datenquellen und Verarbeitungslogiken können über Konfigurationsdateien flexibel angepasst werden, sodass derselbe Dienst für unterschiedliche Fragestellungen oder Simulationsmodelle genutzt werden kann. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die ortsunabhängige Ausführbarkeit: Der AI-Client-Service kann sowohl auf dem zentralen VIDS-Server betrieben werden als auch auf externen Geräten, wie lokalen Personal Computers (PCs), dedizierten Servern, Rechenzentrumsressourcen oder Cloud-Umgebungen. Durch die entkoppelte MQTT-Kommunikation können rechenintensive Modelle bedarfsgerecht ausgelagert oder vollständig getrennt von der zentralen Infrastruktur betrieben werden. Zudem lassen sich mehrere Instanzen des Services parallel betreiben, um unterschiedliche Projekte, Modelle oder Use Cases gleichzeitig zu bedienen.

Damit stellt der AI-Client-Service eine robuste, flexible und standardisierte Integrationsschicht für KI-/ML-basierte Entscheidungsunterstützung dar und bildet einen zentralen Baustein für zukünftige Forschungs- und Anwendungsszenarien im Bereich industrieller Digitalisierung.

4.5 Bereitstellung der Server- und Service-Infrastruktur

Für den operativen Betrieb der VIDS-Services wurde durch die Zentrale IT (ZIT) der Ohm ein dedizierter virtueller Server bereitgestellt. Die virtuelle Maschine (VM) basiert auf Ubuntu 24.04 LTS, verfügt über 64 GB Arbeitsspeicher, eine 4x4-CPU-Konfiguration sowie einen für Daten optimierten Storage-Bereich. Der Zugang erfolgt ausschließlich über SSH-Key-Authentifizierung und sicherheitsrelevante Updates werden automatisiert eingespielt. Die VM ist damit als robuste und langfristige Betriebsumgebung ausgelegt und wird für dieses Projekt bis 2030 zur Verfügung stehen.

Da der Serverzugang erst zum Projektende bereitgestellt wurde, erfolgte die vollständige Entwicklung und Erprobung der VIDS-Softwarekomponenten bislang auf einem prototypischen Entwicklungsserver. Auf diesem wurden Containerisierung, Datenpipeline, Dashboarding, KI-Kopplung und das gesamte Systemverhalten validiert. Die produktive Infrastruktur muss nun auf den neu bereitgestellten Server übertragen und final eingerichtet werden. Diese Arbeiten werden unterstützt durch entsprechende laufende Abschluss- und Projektarbeiten.

Der anstehende Systemumzug umfasst insbesondere:

- Installation aller erforderlichen Systempakete und Laufzeitumgebungen.
- Übertragung der bestehenden Docker-Compose-Konfigurationen für MQTT-Broker, MongoDB, Elasticsearch, Grafana, API-Gateway und projektspezifische Python-Services.
- Anpassung der Netzwerkkonfiguration und Hinterlegung der benötigten Umgebungsvariablen (zum Beispiel MQTT-Zugangsdaten, Datenbankendpunkte).
- Einrichtung von Nutzer- und Rollenstrukturen sowie Secure-Shell-(SSH-)Zugängen für Administratorinnen und Administratoren sowie Entwicklerinnen und Entwickler.
- Migration bestehender Testdaten und Neuinitialisierung der Datenbanken.
- Einbindung des Systems in das Monitoring (PRTG) sowie Umsetzung der IT-Sicherheitsrichtlinien.
- Validierung aller Dienste im Parallelbetrieb und End-to-End-Test mit Simulation und KI-Clients.

Während auf dem prototypischen Server bereits alle zentralen Funktionen implementiert und getestet wurden, markiert der neue VIDS-Server den Übergang in eine dauerhafte, hochschulübergreifende nutzbare und skalierbare Betriebsumgebung. Der bevorstehende Umzug stellt daher einen wesentlichen nächsten Schritt zur Verstetigung der Forschungsplattform dar und bildet die Grundlage für zukünftige Projekte sowie die geplante organisationsübergreifende Nutzung.

4.6 Entwicklung eines Demonstrationsmodells in Plant Simulation

Im Rahmen des Projekts wurde ein Demonstrationsmodell in Siemens Plant Simulation entwickelt, das als prototypischer Anwendungsfall für virtuelle Digitalisierungsszenarien dient. Das Modell bildet eine exemplarische Produktionslinie im Bereich Elektromotorenfertigung (E-Drive) ab und veranschaulicht das Zusammenspiel von Simulation, IoT-Kommunikation, Datenverarbeitung und KI-Integration innerhalb der VIDS-Architektur. Der Schwerpunkt lag darauf, ein Simulationsmodell zu entwickeln, das sowohl realitätsnahe Prozessdynamiken abbildet als auch vollständig in die digitale Systemarchitektur integriert ist. Dazu wurden Maschinen, Puffer, Förderbänder, Lager und Bestandsgrößen so modelliert, dass sie während der Laufzeit kontinuierlich vielfältige Daten erzeugen, die über einen eigens entwickelten OHM-MQTT Baustein an den MQTT-Broker gesendet werden.

Das Demonstrationsmodell dient zur Abbildung zentraler VIDS-Konzepte und bildet damit die **technische Architektur** des Gesamtsystems exemplarisch nach. Es umfasst simulierte Produktionsressourcen, die Prozesszeiten, Betriebszustände und weitere relevante Kenngrößen generieren sowie Fördertechnikmodelle, welche Materialflüsse, Pufferlogiken und Transportzeiten realitätsnah nachbilden. Ergänzend werden wichtige Leistungskennzahlen wie Work-in-Progress, PartsPerHour, Lead Time und Gesamtausstoß kontinuierlich im Modell berechnet. Alle diese Informationen werden in AAS-basierten Datenstrukturen organisiert und über den MQTT-Broker in das VIDS-Datenökosystem übermittelt. Zudem integriert das Demonstrationsmodell eine Backpressure-Logik, die die Simulationsgeschwindigkeit dynamisch anpasst, sobald der DB-Client-Service eine erhöhte Auslastung meldet. Darüber hinaus ermöglicht das Modell die Einbindung und Kopplung externer KI- und ML-Modelle, deren Entscheidungen in Echtzeit in den Simulationsablauf zurückgeführt werden können.

Neben seiner Funktion als technischer Demonstrator kann das Modell auch gezielt als **Lehr- und Forschungstool** eingesetzt werden. Es unterstützt Studierende dabei, ein integriertes Verständnis digitaler Produktionssysteme und ihrer Datenflüsse zu entwickeln. Darüber hinaus eignet es sich zur Untersuchung von Forschungsfragen im Bereich Datenverarbeitung, KI-Einsatz und Prozesssteuerung sowie zum kontrollierten Vergleich unterschiedlicher KI-Modelle. Durch die Generierung synthetischer, aber realitätsnaher Daten können Big-Data-Analysen durchgeführt und neue Digitalisierungsszenarien prototypisch erprobt werden, bevor diese in realen industriellen Systemen umgesetzt werden.

Damit stellt das Plant-Simulation-Modell den sichtbaren Demonstrator des gesamten VIDS-Konzepts dar und ist ein zentraler Baustein für die geplante Weiterentwicklung der Plattform.

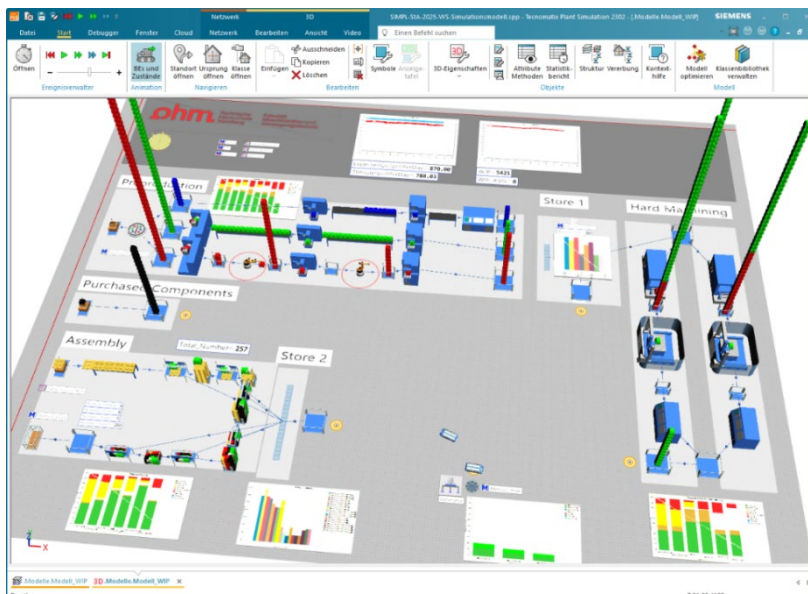


Abbildung 4: Demonstrationsmodell „E-Achse“. Bild: Eigene Darstellung

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die im Projekt entwickelte VIDS-Plattform ist auf langfristige Nutzung und Erweiterbarkeit ausgelegt und bietet damit eine nachhaltige Grundlage für zukünftige Forschungs- und Lehraktivitäten. Durch den Einsatz etablierter **Open-Source-Technologien** wie MQTT, Docker, MongoDB, Elasticsearch, Grafana und Python bleibt die Architektur unabhängig von proprietären Systemen und kann flexibel weiterentwickelt oder skaliert werden. Die Bereitstellung eines dedizierten Servers durch die Zentrale IT ermöglicht zudem den **dauerhaften Betrieb der Plattform** und bildet die Basis für eine hochschulweite Nutzung in Forschung und Lehre.

Ein zentraler Beitrag zur Nachhaltigkeit liegt in der **Wiederverwendbarkeit der entwickelten Komponenten**. Sowohl das Demonstrationsmodell als auch die Daten- und KI-Services lassen sich problemlos an neue Forschungsfragen anpassen. Dadurch eignet sich VIDS besonders zur Durchführung von **Abschlussarbeiten, Projektarbeiten und Lehrveranstaltungen**, in denen Studierende eigene Datenpipelines, Visualisierungen oder KI-Modelle entwickeln und in einem realitätsnahen digitalen Szenario erproben können. Die generierten Daten bieten darüber hinaus wertvolles Material für Big-Data-Analysen, Data-Engineering-Aufgaben und methodische Untersuchungen im Bereich Machine Learning.

Darüber hinaus ist im Rahmen der wissenschaftlichen Verwertung geplant, Beiträge auf der **ASIM-Konferenz**, der zentralen Fachkonferenz der deutschsprachigen Simulationscommunity, einzureichen. Ziel ist es, die VIDS-Plattform dort einem breiten wissenschaftlichen Publikum vorzustellen und weitere **Hochschulen für eine Integration in die VIDS-Community** zu gewinnen. Durch die Präsentation der technischen Architektur, des Demonstrators und der Forschungsanwendungen soll ein Austausch mit anderen Expertinnen und Experten in den Bereichen Simulation, digitale Zwillinge und Produktionssysteme angestoßen werden. Dies bietet die Chance, die Plattform weiterzuentwickeln, neue Kooperationspartner zu gewinnen und VIDS als offene Forschungsinfrastruktur in der Simulationsgemeinschaft zu etablieren.

Ein wichtiger Aspekt der Nachhaltigkeit ist zudem der offene Zugang zu den Ergebnissen. Der entwickelte Code wird in einem **GitHub-Repository** veröffentlicht und damit für andere Forschende und Projektpartnerinnen und -partner transparent zugänglich gemacht. Ergänzend wurde eine ausführliche technische Dokumentation in englischer Sprache in **BayernCollab** erstellt, das Installationsanleitungen, Architekturbeschreibungen, Tutorials und Nutzungsszenarien enthält. Diese Dokumentation unterstützt sowohl neue Nutzende als auch Kooperationspartnerinnen und -partner beim Einstieg in die Plattform.

Die Architektur ist bewusst kollaborativ ausgelegt und ermöglicht es, mehrere Projekte parallel zu betreiben oder externe Partnerinnen und Partner einzubinden. Das VIDS-Konzept wurde ursprünglich in Zusammenarbeit mit der **Technischen Hochschule Ingolstadt (THI)** und der **Technischen Hochschule Würzburg-Schweinfurt (THWS)** entworfen und soll zukünftig als gemeinsame Forschungs- und Lehrinfrastruktur genutzt und weiterentwickelt werden. Bereits im Projektverlauf wurde zudem eine erste internationale Zusammenarbeit mit der **Swinburne University of Technology (Australien)** initiiert. Durch die entkoppelte Kommunikationsarchitektur können externe Forschungsgruppen eigene KI-Modelle oder Analysekomponenten über MQTT an die VIDS-Plattform anbinden, ohne physisch vor Ort zu sein. Damit bietet VIDS ein hohes Potenzial für langfristige nationale und internationale Forschungskollaborationen und den Aufbau einer offenen Community für virtuelle Digitalisierungsszenarien.

Perspektivisch kann die Plattform um weitere Produktions- oder Logistiksznarien ergänzt, um zusätzliche KI-Methoden erweitert oder um automatisierte Deployment-Mechanismen (CI/CD) ausgebaut werden. Darüber hinaus eignet sich **VIDS als Technologie-Demonstrator für Industriepartnerinnen und -partner**, die Digitalisierungsszenarien oder KI-Anwendungen zunächst in einer sicheren virtuellen Umgebung testen möchten, bevor sie in reale Produktionssysteme überführt werden.

Damit schafft VIDS eine nachhaltige, offene und kollaborative Infrastruktur, die über das Projekt hinaus wertvolle Impulse für Forschung, Lehre und Wissenstransfer liefert.

6. Literatur

- Plattform Industrie 4.0 (2022): Details of the Asset Administration Shell – Part 1: The Asset Administration Shell. Version 3.0. Industrial Digital Twin Association (IDTA). Online verfügbar unter: <https://industrialdigitaltwin.org>.
- OASIS (2019): MQTT Version 5.0 – MQTT: Message Queuing Telemetry Transport. OASIS Standard. Online verfügbar unter: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>.
- Kagermann, H., Anderl, R. & Gausemeier, J. (Hrsg.) (2016): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration. Springer Vieweg.

Impressum

Vorlaufforschung 2025

Herausgeber:

Der Präsident der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg

Redaktion und Layout:

Mario Kraußner, Nina Hafner
Hochschulkommunikation und -marketing
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Stand: März 2026

