



Vorlauf- forschung

2023

Vorwort Vorlaufforschung 2023

Liebe Leserinnen, liebe Leser,



Lehre und Forschung bilden die beiden zentrale Elemente, um die sich das Handeln an Hochschulen dreht. Bei uns als einer Hochschule für Angewandte Wissenschaften sind sowohl die Lehre als auch die Forschung von Anwendungsnähe gekennzeichnet. Und wie anwendungsnah Forschung an der Ohm betrieben wird, zeigen auch wieder die Ergebnisse der Vorlaufforschungsprojekte 2023. Neben dieser Anwendungsnähe präsentiert sich in dem vor Ihnen liegenden Band bzw. dem geöffneten Dokument einmal mehr die Breite des Forschungsspektrums unserer Hochschule und es liegen beeindruckende wissenschaftliche Ergebnisse vor, zu denen den beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zu gratulieren ist.

Elf Projekte wurden 2023 mit insgesamt 352.067,51 € aus TH-Mitteln gefördert und verteilen sich auf unsere verschiedenen Forschungsschwerpunkte. Im Jahr 2023 besonders umfangreich und mit gleich fünf Projekten vertreten ist dabei der Forschungsschwerpunkt „Materialien und Produktionstechnik“. In diesem Schwerpunkt wurden Fertigungsverfahren im Bereich der Additiven Fertigung oder der partikelbasierten Prozesse weiterentwickelt und Untersuchungen durchgeführt zur Reduktion von Emissionen durch den Einsatz geeigneter Materialien, zum Recycling von Kompositprodukten und zum Einsatz integrierter optischer Sensoren. Die beiden Projekte aus dem Forschungsschwerpunkt „Digitalisierung und Künstliche Intelligenz“ zeigen anhand der Beispiele Onlineberatung und computergenerierter Filmmusik, dass die Möglichkeiten der Künstlichen Intelligenz in ganz unterschiedlichen Bereichen unseres Lebens positiv genutzt werden können. Und auch fast allen anderen Forschungsschwerpunkten kann jeweils mindestens ein Forschungsprojekt aus der Vorlaufforschung dieses Jahres zugeordnet werden.

So spiegelt die Vorlaufforschung das gesamte Forschungsspektrum unserer Hochschule wider. Die Projekte zeigen die Forschungsstärke unseres Promotionszentrums „Materialien und Produktionstechnik“ und bestätigen den Bedarf an zusätzlicher Forschungsfläche, dem ab 2025 durch unser Ohm Innovation Center begegnet werden kann. Viele unserer Forschenden werden in dem neuen Gebäude von den dort dann vorhandenen deutlich verbesserten Forschungsrandbedingungen profitieren.

Ebenfalls einen Schub für unsere Forschung erhoffen wir uns von dem 2023 in Kronach gestarteten Technologietransferzentrum (TTZ), das sich dem Thema Künstliche Intelligenz verschrieben hat. Der enge Kontakt zwischen Wissenschaftlern unserer Hochschule und Unternehmen aus dem dortigen Landkreis soll gemeinsame Forschungsaktivitäten initiieren, die Anwendungsnähe unserer Forschung weiter stärken und die beteiligten Unternehmen, Kommunen und Institutionen in der betroffenen Region bei der Bewältigung der bevorstehenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen unterstützen. Ich gehe davon aus, dass es für unsere Hochschule nicht bei einem TTZ bleiben wird und hoffe zugleich, dass auch einige Projekte aus der Vorlaufforschung 2023 Anknüpfungspunkte für Forschungs Kooperationen im Rahmen von Technologietransferzentren bieten.

Solche Anknüpfungspunkte und ganz allgemein die Überführung der aFuE-Ergebnisse in geeignete Transferformate oder die erfolgreiche Weiterführung der Vorlaufforschungsprojekte in drittmittelgeförderter oder anderer Form wünschen wir natürlich allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, deren Untersuchungen im vorliegenden Band zusammengefasst sind. 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 2023

Vorwort Vorlaufforschung 2023	3
Prof. Dr. Tilman Botsch Vizepräsident für Forschung und Transfer	
GeCCo 1.0 – Erstellung eines öffentlichen Datensatzes für die KI-basierte Inhaltsanalyse in der Onlineberatung	7
Prof. Dr.-Ing. Jens Albrecht, Prof. Dr. Robert Lehmann Fakultät Informatik Aleksandra Poltermann, M.A. Fakultät Sozialwissenschaften/Institut für E-Beratung	
Rad und Bahn – intermodale Verknüpfung auch im ländlichen Raum	23
Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohlinger, Robert Künzler, B.Sc., Andreas Vogler Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Schienenverkehrswesen	
How to prevent Caking? – Trockene, partikelbasierte Prozesse effizient gestalten	43
Prof. Dr. Sandra Breitung-Faes Fakultät Verfahrenstechnik/Mechanische Verfahrenstechnik Sofia Dibrova, M. Eng. Fakultät Verfahrenstechnik	
„Sat2Surf – Automatisierte Auswertung von freierverfügbaren Radar-Satellitendaten zur Ermittlung von Hochwasserüberschwemmungsflächen (Surfaces) in großräumigen Skalenbereichen“	54
Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen, Lilly Feile, Michael Kögel, M. Eng., Fabian Möldner, M. Sc., Fabian Teckentrup Fakultät Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft	
BattElAnalytik – Analytik von Alterungsprozessen in Lithiumionen-Elektrolyten für Nutzfahrzeuganwendungen	63
Prof. Dr. Maik Eichelbaum Fakultät Angewandte Chemie/Institut für Angewandte Wasserstoffforschung, Elektro- und Thermochemische Energiesysteme (H2O _{hm}) Syaleen Fairuzza Binti Sharuddin, M. Sc. Fakultät Angewandte Chemie	
Maßgeschneiderte organische Halbleiter für flexible Low-cost-Infrarotdetektoren auf der Basis computergestützter Modellierung (INFRACost)	76
Prof. Dr. Markus Hummert Fakultät Angewandte Chemie/OHM-CMP Labor für molekulare Funktionsmaterialien	
Additive Verzahnung	84
Additive Fertigung von Schneckenverzahnungen zur lastoptimalen Geometrieauslegung Prof. Dr.-Ing. Alexander Monz, Johannes Gründer, M.Sc. Andrea von Lattre-Hertel Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)	

REnuka – Reduktion von Emissionen durch nachhaltige Binder für Hochleistungskeramiken	99
Prof. Dr.-Ing. Dominik Söthje, Florian Bauer, M. Sc., Julian Beier, B. Sc Fakultät Angewandte Chemie	
Prof. Dr.-Ing. Hannes Kühl Fakultät Werkstofftechnik	
Handoyo Hendrawidjaja, B. Sc. Fakultät Verfahrenstechnik	
<hr/>	
Zugang zu wohnungslosen Migrant*innen (ZuWoMi)	114
Prof. Dr. Frank Sowa, Dr. Anna Xymena Tissot Fakultät Sozialwissenschaften Studentische Projektmitarbeitende Natasha Crickmore, Lana Lamsfuß, Denis Nesklada, Lukas Rosenthal, Fakultät Sozialwissenschaften, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm	
<hr/>	
Recycling von komplexen Kompositprodukten – Prozessschritt Zerkleinerung	126
Prof. Dr. Ing. Ulrich Teipel, Patrick Walther, M. Sc. Fakultät Verfahrenstechnik / Forschungsgruppe „Partikeltechnologie und Rohstoffeffizienz	
<hr/>	
CGF – Erzeugung affektiver Computer-generierter Filmmusik mittels Sprach-Emotionserkennung	141
Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann, Tom Schmid, M. Eng. Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik/Kompetenzzentrum OHM-UX Garri Steba, M. Eng. Fakultät Design	

GeCCo 1.0 – Erstellung eines öffentlichen Datensatzes für die KI-basierte Inhaltsanalyse in der Onlineberatung

Prof. Dr.-Ing. Jens Albrecht

Fakultät Informatik

Prof. Dr. Robert Lehmann

Fakultät Informatik

Aleksandra Poltermann, M.A.

Fakultät Sozialwissenschaften/Institut für E-Beratung,

Zusammenfassung:

Ein Einsatzfeld künstlicher Intelligenz im Bereich der Sozialen Arbeit ist die automatische Inhaltsanalyse von Konversationen aus der psychosozialen Onlineberatung. Mögliche Anwendungen sind die statistische Untersuchung von Wirkzusammenhängen sowie die Entwicklung KI-basierter Dialog- und Unterstützungssysteme. Die Grundlage für das Training entsprechender Modelle sind aussagekräftige und realistische Trainingsdaten.

Im Rahmen des Projektes GeCCo (German e-Counseling Conversation Dataset) wurde ein erster deutschsprachiger Datensatz für die Analyse psychosozialer Beratungskonversationen erstellt und veröffentlicht. Wesentlicher Bestandteil ist ein neu entwickeltes Kategoriensystem, das eine feingranulare inhaltliche Klassifikation in 40 Beratenden- und 28 Klienten-Kategorien ermöglicht. Basierend auf dem Datensatz konnten erfolgreich verschiedene Modelle mithilfe maschineller Lernverfahren trainiert und für die wissenschaftliche Nutzung bereitgestellt werden.

1 Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Informatik in Kooperation mit dem Institut für E-Beratung
Projektleitung	Prof. Dr. Jens Albrecht, Prof. Dr. Robert Lehmann
Projektkoordination	Aleksandra Poltermann, M.A.
Assoziierte Projektmitarbeitende	Jennifer Burghardt, M.A. Carolyn Haberkern, B.A. Mara Stieler, M.A. Studentische Hilfskräfte aus Sozialer Arbeit und Informatik
Kontakt Daten Projektleitung	jens.albrecht@th-nuernberg.de , robert.lehmann@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Prognosen verdeutlichen, dass etwa 25 Prozent der Bevölkerung im Lauf ihres Lebens auf soziale Beratung zurückgreifen (ZAUTER & LEHMANN, 2021). Insbesondere im Zuge der fortschreitenden Corona-Pandemie war eine verstärkte Internet-Recherche im Bereich gesundheitsbezogener Beratungsthemen zu beobachten (HORCH, 2021) – begleitet von einer vermehrten Nutzung von Onlineberatungsangeboten (STIELER u. a., 2022). Das Institut für E-Beratung (IEB) der Technische Hochschule Nürnberg hat es sich zur Aufgabe gemacht, innovative Ansätze in der Online-Sozialberatung zu erforschen. In Kooperation mit der Fakultät Informatik wurden bereits mehrere Projekte erfolgreich umgesetzt, die gezielt das Potenzial von künstlicher Intelligenz in diesem Kontext untersuchten (vergleiche dazu (ALBRECHT u. a., 2021; LEHMANN u. a., 2021)).

Das Ziel dieser Projekte ist es, mithilfe technischer Unterstützung die Qualität der Onlineberatung zu verbessern. Dabei ist es für das IEB immer entscheidend, technische Möglichkeiten so nutzbar zu machen, dass sie möglichst direkt einen Nutzen für Ratsuchende beziehungsweise Beratende entfalten. Ein Beispiel dafür ist das Projekt "KIA-KI-basierte Assistenz in der Onlineberatung", das durch das Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend gefördert wird.

In dem Projekt wird ein Assistenzsystem entwickelt, das Onlineberaterenden während einer Beratung interaktives Feedback gibt. Voraussetzung dafür ist eine inhaltliche Analyse der Beratungskonversation. In einem weiteren Forschungsprojekt, das die Stiftung Hochschullehre fördert, wird ein Chatbot entwickelt, der eine Klientin oder einen Klienten mit psychosozialen Problemen simuliert. Dieser "virtuelle Klient" soll in der Ausbildung für Online-Beraterende als Trainingsobjekt eingesetzt werden.

Voraussetzung für die Analyse von Beratungskonversationen und die Entwicklung von intelligenten Assistenten ist immer ein inhaltliches und methodisches Verständnis der Beratungskonversationen. Hierbei müssen die Konversationen mit einem vertieften Verständnis der fachlichen Anforderungen analysiert werden. Um Onlineberatung also belastbar wissenschaftlich zu analysieren, sind qualitative Forschungsmethoden, die mit einem relativ fundierten Textverständnis arbeiten notwendig. Bisher bedeutete das, dass Analysen von entsprechend geschulten, menschlichen Forschenden erfolgen mussten.

Qualitative Analysen zeichnen sich meist durch ein systematisches Vorgehen aus, bei dem Textdaten mithilfe induktiver oder deduktiver Codierung strukturiert werden. Hierbei werden Kategorien entwickelt, um den Inhalt anschließend unter Verwendung klar definierter Regeln zu interpretieren. Das

limitierte die Menge der analysierten Texte deutlich. Die Entwicklungen im Bereich des maschinellen Lernens, speziell im Natural Language Processing ermöglichen es heute, komplexe Eigenschaften aus entsprechenden Daten zu erlernen. Die technische Basis für aktuelle Systeme bilden Deep-Learning-Modelle mit Transformer-Architektur (VASWANI u. a., 2017).

In der Praxis werden häufig vortrainierte Sprachmodelle wie BERT (DEVLIN u. a., 2019) eingesetzt, die mit relativ wenig Trainingsdaten auf ein konkretes Problem, zum Beispiel das Erkennen von Emotionen oder anderen inhaltlichen Merkmalen abgestimmt werden können ("Fine Tuning"). Im Vorlaufforschungsprojekt CaSoTex konnte beispielsweise gezeigt werden, dass solche Modelle Kategorien wie "Mitgefühl" oder "Handlungsempfehlung" in Äußerungen von Ratsuchenden oder Beratenden mit vergleichbarer Präzision wie Menschen bestimmen konnten (GRANDEIT u. a., 2020). Dadurch wird es möglich, den Einsatz einer automatisierten Inhaltsanalyse ernsthaft zu erwägen. Allerdings ist es notwendig, vortrainierte Sprachmodelle auf passende Datensätze zur Onlinberatung abzustimmen

3 Ziele des Forschungsprojekts

Die automatisierte Inhaltsanalyse, wie sie auf großen Datenmengen erst durch den Einsatz maschineller Lernverfahren ermöglicht wird, ist eine wesentliche Voraussetzung für die statistische Untersuchung von Wirkzusammenhängen in der psychosozialen Beratung und die Entwicklung beratungsunterstützender, KI-basierter Dialogsysteme. Insgesamt gibt es nur wenige Datensätze, die sich explizit mit Beratung beziehungsweise speziell mit der Onlineberatung beschäftigen, sodass entsprechendes Fine-Tuning bisher noch selten erfolgt ist.

Ein Grund dafür ist, dass Daten aus psychosozialen Beratungen in der Regel nicht nur personenbezogene, sondern auch sehr persönliche und vertrauliche Informationen beinhalten. Zudem ist die manuelle Annotation der Daten sehr aufwändig, da sie Fachexpertinnen und Fachexperten benötigt. Die wenigen vorhandenen Datensätze sind zudem fast ausschließlich in Englisch verfügbar, im deutschsprachigen Raum gab es bisher keine frei verfügbaren Trainingsdaten, mit denen entsprechende Modelle erforscht werden könnten.

Ziel dieses Projektes war daher die Erstellung und Veröffentlichung eines ersten deutschsprachigen Datensatzes für die Inhaltsanalyse in der psychosozialen Beratung. Die Vertraulichkeit der Daten wird dadurch gewährleistet, dass entweder reale Daten manuell anonymisiert werden oder künstliche Beratungsdialoge durch Fachexpertinnen und Fachexperten in Anlehnung an realen Daten kreiert werden.

Ein wesentliches Etappenziel des Projekts und Voraussetzung für die Annotation der Daten war die Definition der inhaltlichen Kategorien, die erkannt werden sollen (zum Beispiel "Reflexion", "Anregung zur Ressourcenaktivierung"). Daneben sollte auch ein fertig trainiertes Klassifikationsmodell publiziert werden, das von anderen Forschenden direkt für die Textkategorisierung im Kontext sozialer Beratung eingesetzt und darüber hinaus als Benchmark für andere Modelle genutzt werden kann.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Nach der Analyse des Standes der Forschung und einer eingehenden Sichtung der verfügbaren Datensätze und Kategoriensysteme erfolgte die Erstellung eines umfassenden Kategoriensystems zur Annotation des Datensatzes. Im Anschluss wurde ein Fine-Tuning von mehreren Basismodellen mit diesen Daten vorgenommen, um zu bewerten, ob, beziehungsweise wie gut die Kategorien automatisiert erkannt werden können.

4.1 Stand der Forschung

Mit der Inhaltsanalyse im Kontext digitaler Onlineberatung beschäftigen sich einige wenige Arbeiten im englischen Sprachraum (zum Beispiel (ALTHOFF U. A., 2016; DEMASI U. A., 2020; LIU U. A., 2021)). Die vorhandenen Trainingsdatensätze werden jedoch häufig nicht publiziert und sind auch auf Nachfragen nicht verfügbar. So kann beispielsweise die Nutzung der Trainingsdaten aus (ALTHOFF U. A., 2016) und (DEMASI U. A., 2020) nur durch Forschende hochrangiger Institute aus den USA oder Kanada erfolgen.

Grundlegend für die Inhaltsanalyse ist ein Kategoriensystem (auch Codebuch oder Annotationschema), das die inhaltlichen Kategorien präzise definiert (LAMNEK & KRELL, 2016). Anhand dieses Kategoriensystems können dann bestehende Daten annotiert werden. Maschinelle Lernverfahren können die so erstellten Trainingsdaten nutzen, um Modelle für die automatische Zuordnung von Kategorien in Beratungskonversationen zu berechnen.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über verfügbare Datensätze und Kategoriensysteme gegeben, die teilweise konzeptuell in den GeCCo-Datensatz eingeflossen sind.

4.2 Kategoriensystem 'Motivational Interviewing Skill Codes (MISC)' (MILLER u. a., 2008)

Die motivierende Gesprächsführung (Motivational Interviewing, MI) ist ein klientenzentrierter Beratungsansatz, der ursprünglich für die Suchtberatung entwickelt wurde und mittlerweile unter anderem in der Psychotherapie Anwendung findet. MI richtet sich vor allem an Personen mit zunächst geringer oder ambivalenter Änderungsbereitschaft. Dabei soll die intrinsische Motivation der Patientinnen und Patienten beziehungsweise Klientinnen und Klienten für eine Verhaltensänderung durch entsprechende Fragen aktiviert werden. Eine zentrale Technik, um Verständnis und Empathie zu zeigen sowie den Dialog zwischen Beratendem und Klientinnen und Klienten zu vertiefen, ist beispielweise die Reflexion. Das Kategoriensystem MISC umfasst insgesamt 28 Kategorien, wobei besonders die Beratenden-Kategorien interessant sind. Diese Kategorien: Advise, Affirm, Confront, Direct, Emphasize Control, Facilitate, Filler, Giving Information, Question (Closed or Open), Raise Concern (with or without Permission), Reflection (Simple or Complex), Reframe, Support, Structure und Warn. In (XIAO U. A., 2016) UND (CAO U. A., 2019) werden maschinelle Lernverfahren zur Erkennung von MI-Codes vorgestellt. Dabei wurden allerdings die Beratenden-Kategorien sehr grob in "MI-adherent" und "MI non-adherent" zusammengefasst. Die verwendeten Datensätze sind nicht öffentlich.

4.2.1 Datensatz 'ESConv' (LIU u. a., 2021)

Emotionale Unterstützung der Klientinnen und Klienten ist ein wichtiges Element in der psychosozialen Beratung. (LIU U. A., 2021) stellen in ihrer Arbeit den Datensatz ESConv (Emotional Support Conversation) sowie ein entsprechendes Framework für die Modellierung von Dialogen und entsprechende Kategorien vor. Es wird davon ausgegangen, dass Konversationen zu emotionaler Unterstützung nach einem Phasenmodell mit folgenden Stufen (Stages) ablaufen: Comforting, Exploration, Action. Parallel dazu werden bestimmte Support-Strategien definiert, die als inhaltliche Kategorien verstanden werden können. Unterschieden werden hier Question, Restatement or Paraphrasing, Reflection of Feelings, Self-disclosure, Affirmation and Reassurance, Providing Suggestions, Information und Others. Darüber hinaus wurden zusätzliche Merkmale, wie die Art des Problems oder die Emotionalität erfasst. Der öffentlich verfügbare Datensatz umfasst 1.053 Konversationen bestehend aus über 31.000 Äußerungen.

4.2.2 Datensatz 'Anno-MI' (WU u. a., 2022, 2023)

Anno-MI ist ein öffentlicher, englischsprachiger Datensatz, der transkribierte und von Therapeutinnen und Therapeuten kommentierte Therapedialoge zum Motivational Interviewing (MI) umfasst. Er besteht aus 133 per Video aufgezeichneten Gesprächen, die die wesentlichen Merkmale des MI wiedergeben. MI als psychologische Methode zielt auf Verhaltensänderung im therapeutischen Setting ab. Die Schlüsselemente des MI (OARS nach (MILLER & ROLLNICK, 2015)) sind aufgeteilt nach Klient und

Beratendem. Die Beratenden-Kategorien (Therapist Behaviour) umfassen Reflection (Simple, Complex), Question (Open, Closed), Input (Information, Advice, Giving Options und Negotiation) und Other. Bei den Klientinnen und Klienten (Client Talk Type) wird unterschieden in Change, Neutral und Sustain. Während der sogenannte Change Talk eindeutig direktiv ist und somit spezifisch auf das MI zurückgeht, sind die anderen MI-Strategien wie Reflection und Question in der nicht direktiv klientenzentrierten Gesprächsführung von Rogers verortet (MILLER U. A., 2008).

4.2.3 Datensatz 'HOPE' (MALHOTRA U. A., 2022)

Der öffentliche HOPE-Datensatz umfasst etwa 12.900 Äußerungen von 212 Therapiesitzungen aus dem Bereich der kognitiven Verhaltenstherapie (Cognitive Behavioral Therapy, CBT). Für die Annotation wurde ein Kategoriensystem, bestehend aus zwölf Kategorien, organisiert in drei Oberkategorien entwickelt. Das Kategoriensystem deckt sowohl die Beratenden- als auch die Klientinnen und Klienten-Äußerungen ab und soll eine möglichst gute Inhaltsanalyse der Daten ermöglichen. Im Einzelnen sind folgende Kategorien definiert: Speaker Initiative (Clarification Request, Opinion Request, Information Request, Yes/No Question), Speaker Responsive (Information Delivery, Clarification Delivery, Opinion Delivery, Positive Answer, Negative Answer) und General (Greeting, Acknowledgement, General Chat). Neben dem Datensatz wird in (MALHOTRA U. A., 2022) auch das Verfahren "Time-aware Attention" vorgestellt, das die zeitliche Abfolge der Äußerungen bei der Klassifikation berücksichtigt.

4.3 Kategoriensystem von [SafeZone.ch](#) (SCHLAPBACH U. A., 2018)

[SafeZone.ch](#) ist eine Online-Plattform für Suchtberatung. Die Beratung richtet sich an Betroffene, deren Angehörige und Nahestehende, an Fachpersonen und Interessierte. Alle Beratungsangebote sind kostenlos und anonym. Die Plattform wurde ab 2014 tiefgehend evaluiert. Der für das Projekt relevante Part bezieht sich auf hundert E-Mail-Beratungen zur Anwendung von Wirkfaktoren in der Mail-Beratung von [SafeZone.ch](#) (Zeitraum 2014-2017). Die betrachteten Kategorien beziehen sich auf die sogenannten "Wirkfaktoren" (Problemaktivierung, motivationale Klärung, therapeutische Beziehung, Ressourcenaktivierung etc.) nach (GRAWE, 1998) und sechs weitere Wirkfaktoren entsprechend der spezifischen Rahmenbedingungen der E-Mail-Beratung (psychologische Anonymität, Asynchronität, Freiwilligkeit, Beratung als Ko-Produktion etc.). Ein Datensatz ist nicht verfügbar, aber detaillierte Berichte (Evaluationsberichte, Abschlussberichte).

4.4 Kategoriensystem und Datensatz 'CASoTex' (GRANDEIT U. A., 2020; LEHMANN U. A., 2021)

In einem eigenen Vorprojekt wurde eine erste Version eines Kategoriensystems zur Erfassung relevanter Dimensionen der Onlineberatung definiert und evaluiert. Die Datenbasis bilden Nutzendenbeiträge aus acht großen, öffentlichen, psychosozialen Beratungsforen (Sucht- und Selbsthilfe, BKE Jugend- und Elternberatung, Beratungs4Kids, Dr. Azubi, DGB Jugend, Hilfe für Mädchen und Young Wings). Das Kategoriensystem ist mit fünfzig Einzelkategorien recht umfangreich. Es ist eingeteilt unter anderem in die Gruppen "Formalitäten" (zum Beispiel Anrede, Verabschiedung), die sich an den Spezifika der Onlineberatungsmethoden orientieren (ENGELHARDT, 2021; REINDL, 2018), "Grundhaltungen" wie Empathie und Sorge um andere (nach Rogers in: (PAULUS, 2016)), "Wirkfaktoren" wie Problemdarstellung, Handlungsempfehlung (VGL. (GRAWE, 1998)) und unterschieden nach Beratendem und Klientin und Klient. Der Datensatz konnte aufgrund der enthaltenen personenbezogenen Daten nicht veröffentlicht werden, steht den Autorinnen und Autoren jedoch zur Verfügung.

4.4.1 Datensatz 'Counsel Chat' (BERTAGNOLLI, 2020)

Der Datensatz enthält einen Abzug öffentlich verfügbarer Beratungskonversationen von der Internet-Plattform [counselchat.com](#). Auf dieser Plattform bieten professionelle Beratende und Therapeutinnen und Therapeuten Ratsuchenden Hilfe an. Die Daten sind nur in Englisch verfügbar und reine Dialogdaten, das heißt, es ist keinerlei Kategorisierung vorgenommen wurden.

Es wird deutlich, dass es eine sehr geringe Anzahl an Datensätzen gibt, die zur Analyse von Texten aus der Domäne der Onlineberatung nutzbar sind. Diese sind überwiegend nicht öffentlich verfügbar. Die oben erwähnten Projekte stammen nicht alle originär aus der Onlineberatung, sondern sind auf die Analyse von Konversationen aus der Präsenzberatung ausgerichtet. Daraus ergeben sich methodische Unterschiede. Zudem sind Beratung und Therapie jeweils auch nochmal voneinander zu differenzieren in ihrer unterschiedlichen methodischen Herangehensweise. Dennoch liegen viele Gemeinsamkeiten vor, die für die spätere heterogene Auswahl der Kategorien eine Rolle spielten. Während MI beispielsweise nur ein Beratungsansatz ist, zeichnet sich Onlineberatung in der Regel durch ein eklektizistisches Vorgehen aus, also die Nutzung mehrerer Beratungsansätze (vgl. (MODE-SCHEIBEL, 2014)).

Eine weitere Erschwernis besteht folglich in den unterschiedlichen Kategorisierungen der Inhalte. Diese sind zwar jeweils in anerkannten und weitverbreiteten Theorien aus dem Feld der psychosozialen Beratung fundiert, allerdings sind sie in der vorliegenden Form nicht kompatibel. Teilweise überlappen sich die Kategorien, teilweise weisen sie sehr unterschiedliche Erklärungsniveaus auf. Daher ist es erforderlich, einen großen öffentlichen Datensatz für diese Zwecke zu generieren. Weiterhin ist es notwendig, die Daten in dem Datensatz mit einem Kategoriensystem zu bearbeiten, das zu möglichst vielen Theorien und Konzepten der psychosozialen Beratung kompatibel ist und diese Bezüge auch explizit darlegt.

4.5 Erstellung des Kategoriensystems

4.5.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen

4.5.1.1 Ethik und Datenschutz

Onlineberatungsverläufe und deren KI-gestützte Auswertung bringen ethische Implikationen mit sich hinsichtlich der Frage, wie persönliche Daten und Informationen erhoben, verarbeitet und gespeichert werden. Selbst bei vermeintlich öffentlich zugänglichem Material wie Beratungen in öffentlichen Foren ist unklar, inwieweit diese für die Analyse mit maschinellen Lernverfahren genutzt werden dürfen (GHANEM U. A., 2022). Dabei ist zu unterscheiden, ob es sich um *found*, also nicht primär für wissenschaftliche Studien erhobene, oder *designed data*, die für wissenschaftliche Zwecke erhoben wurden, handelt (RAT FÜR SOZIAL- UND WIRTSCHAFTSDATEN (RATSWD), 2023).

Werden Trainingsdaten generiert, die für weitere Modelle genutzt werden können, schließen sich umfangreiche Fragen aus dem Bereich des Datenschutzes, Urheberrechts und der Forschungsethik an. Solche Fragen gehen dann mit Beschränkungen einher und können eine Ursache dafür sein, dass lediglich Teile von Datensätzen veröffentlicht werden. Diese beschränkte Zugänglichkeit verhindert oftmals "[...] die Weitergabe der von Forschenden für eine Publikation verwendeten Daten und damit die Reproduzierbarkeit" (EBD., S. 12). Weiterhin muss der Prozess der Erfassung und Auswertung durch Transparenz und Nachvollziehbarkeit gekennzeichnet sein. Insbesondere im Feld der Sozialen Arbeit müssen Diskriminierungsrisiken vermieden werden, beispielsweise durch die Auswahl der Datensätze und Kennzahlen zur Berechnung und zum Training maschineller Verfahren. Bestimmte Personengruppen dürfen nicht unter- oder überrepräsentiert sein und keine Stereotypen abbilden. Zudem ist eine vollständige Anonymisierung Grundvoraussetzung für die Erstellung eines öffentlichen Datensatzes. Diese umfangreichen Anforderungen machen es nötig, dass entsprechende Datensätze fachlich kuratiert erstellt werden. Angesichts der Vielfalt der Anforderungen überrascht es nicht, dass bisher noch kein solcher Datensatz erstellt wurde.

4.5.1.2 Kategorien:

An den Datensatz werden einerseits aus technischer Sicht Anforderungen für das Training von Modellen herangetragen. So sollen komplexe Sinneinheiten in den Beratungstexten automatisch erkannt und kategorisierbar werden. Die Kategorien können methodischer Natur sein ("Problemdarstellung" auf Klientinnen- und Klientenseite, "fachliche, förmliche, institutionelle Handlungsempfehlung" auf Beratendenseite) oder andere Eigenschaften wie Emotionalität ("eigene Gefühlsdarstellung" auf

Klientenseite, "Nachfrage nach emotionaler Lage" oder "Dank und Wertschätzung an Klientin und Klient" auf Beratendenseite) umfassen. Das verwendete System muss einerseits hinreichend viele Kategorien umfassen, um vielfältige Analysen zu ermöglichen. Andererseits müssen die Kategorien inhaltlich scharf genug voneinander abgrenzbar sein, damit ein Modell überhaupt in der Lage ist, Unterschiede zu erlernen. Diese Trennschärfe wird durch die jeweilige Definition beziehungsweise Kategorienbeschreibung erreicht.

Angestrebt wird darüber hinaus eine weitgehende Vergleichbarkeit und theoretische Kompatibilität mit den Systemen aus den oben dargestellten Datensätzen.

4.5.2 Zielsetzung

Aus der Perspektive der Sozialarbeitswissenschaft sollte der Datensatz mit einem Kategoriensystem bearbeitet sein, das relevante Kriterien aus der Beratungsforschung abbildet. So sind insbesondere im Bereich der Onlineberatung sowohl zur methodischen Gestaltung als auch zum Ausdruck der Emotionalität umfangreiche Wissensbestände vorhanden, zu denen das verwendete Kategoriensystem kompatibel sein sollte (ENGELHARDT, 2021; HILDEBRAND U. A., 2020; STIELER, 2022).

Um anschlussfähige Studienergebnisse generieren zu können, müssen die Kategorien im Datensatz mit diesem Fachdiskurs vergleichbar sein. Dabei ist weiter zu beachten, dass die Sozialarbeitswissenschaft allgemein und die Forschung zur Onlineberatung im Speziellen im deutschsprachigen Raum relativ wenig mit dem internationalen Diskurs verschränkt ist. Gleichzeitig liegen jedoch vereinzelt Trainingsdatensätze im internationalen Feld vor. Daher ist es erstrebenswert, im Projekt GeCCo ein Kategoriensystem zu erstellen, das auch mit den internationalen Datensätzen kompatibel ist und so eine Brücke zwischen nationalem und internationalem Diskurs schlägt.

4.5.3 Vorgehensweise

Um dieses Ziel zu erreichen, musste ein mehrstufiges Verfahren angewandt werden. Als Grundlage wurde das Kategoriensystem aus dem Vorlauforschungsprojekt "Computergestützte Analyse sozialwissenschaftlicher Texte mit Hilfe maschineller Lernverfahren – CASoTex" (GRANDEIT U. A., 2020; LEHMANN U. A., 2021) verwendet. Bereits damals wurden Kategorien aus dem Fachdiskurs eingearbeitet. Allerdings war das Kategoriensystem auf den Anwendungsfall aus CASoTex zugeschnitten und wies einige Limitationen auf, die bereits im Abschlussbericht zu CASoTex thematisiert wurden (LEHMANN U. A., 2020). Daher wurde zunächst ein Expertinnen- und Experten-Team aus assoziierten Projektmitgliedern einberufen. Bei der Teamkonstellation wurde darauf geachtet, dass erfahrene Fachkräfte aus der Onlineberatung und Wissenschaftler*innen aus der qualitativen Onlineberatungsforschung kooperativ theoretische und forschungspraktische Anforderungen einbringen konnten.

Zu Beginn erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche zu bestehenden Kategoriensystemen und Datensätzen mit (Onlineberatungs-)Bezug. Das Projektteam betrachtete verschiedene Kategoriensysteme, die Aufbereitung der enthaltenen Datensätze und ihre vorangegangenen Forschungszwecke. Ziel dieses Vorgehens war es, zunächst eine geeignete Schnittmenge an Kategorien für das Projekt zu identifizieren. Neben den relevanten theoretischen Konstrukten ((GRAWE, 1998), (PAULUS, 2016) ETC.), die für die Beurteilung von Onlineberatungsprozessen relevant sind, wurden also auch die bestehenden Klassifikationen dieser Modelle näher betrachtet, um Unterschiede, Ähnlichkeiten und gegebenenfalls auch Dopplungen in den Kategoriensystemen zu identifizieren.

Der Kern der Erstellung war ein interaktiver Workshop, in dem die verschiedenen bestehenden Ansätze buchstäblich nebeneinandergelegt wurden und so eine Synthese der verschiedenen Ansätze geschaffen wurde, die den Ansprüchen an ein wissenschaftlich fundiertes Kategoriensystem (Abbildung 1) genügt. Berücksichtigt wurden dabei die Unterscheidungen zwischen Klientin und Klient und Beratendem und die verschiedenen Kategorie-Ebenen (von der Oberkategorie bis hin zur kleinsten Stufe der Unterkategorien).



Abbildung 1: Workshop zur Entwicklung des Kategoriensystems. Bild: Jens Albrecht

4.5.4 Ergebnis

Das so erstellte Kategoriensystem weist folgende Eigenschaften auf:

- Als Basis wurden die eigens erstellten Kategoriensysteme des IEB zur Beschreibung fachlicher Elemente der Onlineberatung genutzt.
- Es bezieht sich auf die Seite der Beratenden wie auch auf die Klientinnen und Klienten.
- Es enthält Kategorien; diese sind maximal auf fünf Ebenen untergliedert – die Definition und Ankerbeispiele. Um die Kategorie genau zu bestimmen, wurden Kategoriekürzel angelegt. Hier ein Beispiel:
 - Beratendenseite > Wirkfaktor > Analyse und Klärung der Probleme > Reflexion (Sachverhalt) > Nachfrage zur Lebenslage > soziale Beziehungen
Das entsprechende Kürzel lautet: B-WF-AK-RS-FLL-SB
 - Beibehalten wurden Oberkategorien wie beispielsweise "Formalitäten am Anfang" und "Wirkfaktoren", die sich bewährt haben. Auf der vierten Kategorienebene wurden MI-spezifische Kategorien ergänzt.

Wie oben bereits erwähnt, erfolgt Onlineberatung nach unterschiedlichen Beratungsansätzen – Stichwort Eklektizismus. Ein besonders häufig genutzter ist der des Psychologen Carl. R. Rogers. Er formuliert drei zentrale Linien in der Beratung. Diese sind: das empathische Verstehen, die unbedingte Wertschätzung und Kongruenz (vgl. (WATSON, 2007)). Diese Grundhaltungen spielen neben der Präsenzberatung auch für Onlineberatung eine bedeutende Rolle. Allerdings sind aufgrund der medial vermittelten Kommunikationsform netzspezifische Charakteristika miteinzubeziehen, wie beispielsweise Aspekte der nonverbalen Kommunikation, die im Online-Setting wegfallen. In der Onlineberatung können sich die obengenannten Haltungslinien eben nicht auf Gestik oder Mimik beziehen, sondern kommen in der Textanalyse von zum Beispiel Chat- oder Mail-Beratung zum Tragen.

Eine besondere Lösung wurde für die Kategorie der Empathie gewählt. Angelehnt an Paulus (2016) wird Empathie als Grundhaltung des Mitgefühls und der Sorge verstanden. Es handelt sich hier um ein sehr relevantes Konstrukt, das sich in der schriftbasierte Onlineberatung allerdings selten in alleinstehenden expliziten Aussagen widerspiegelt. Vielmehr tritt es als emotionale Färbung einer anderen, eher inhaltlichen Aussage auf.

Daher wurde die Empathie als zusätzliche Dimension für die Beratenden-Seite in das Kategoriensystem integriert. Dabei wird zu jeder Aussage zusätzlich zu den inhaltlichen Kategorien ein Intensitätsgrad der Empathie (geringe – moderate – ausgeprägte Empathie) kodiert. In der ersten, zum Zeitpunkt dieser Publikation veröffentlichten Version des Datensatzes wurde diese Dimension aus Zeitgründen noch nicht verwendet. Die Grundlage für eine zukünftige Nutzung ist allerdings angelegt.

Der Dreiklang der Grundhaltungen in Anlehnung an Paulus (2016) besteht allerdings noch auf der Seite der Klientinnen und Klienten, da sich hier inhaltliche Bezüge zu anderen Beteiligten ergeben

(Empathie für Dritte (PT-perspective taking, Mitgefühl mit anderen und Sorge um andere Person (EC-emotional concern) (VGL.(YU U. A., 2020) und (PAULUS, 2016)).

Eine weitere Erweiterung des Kategoriensystems ist die inhaltliche Kompatibilität zum ESCon-Datensatz (LIU u. a., 2021). Dabei soll ein möglichst analoges Phasenmodell in die Logik des GeCCo-Datensatzes integriert werden.

4.6 Erstellung des Datensatzes

Da für solch einen Datensatz ein hoher Qualitätsstandard angesetzt werden muss, wurde großer Aufwand auf verschiedenen Ebenen betrieben. Zum einen wurden die Annotator*innen ausführlich in der zugrundeliegenden Methodik unterwiesen. Das Team bestand aus fünf ausgebildeten Online-Beraterinnen sowie fünf studentischen Hilfskräften aus dem Studiengang Soziale Arbeit und einer weiteren aus dem Studiengang Informatik. Fachlich angeleitet wurde diese Gruppe von der Projektkoordination und der Projektleitung.

Da sich die Projektleitung zusammen mit dem Institut für E-Beratung bereits seit etlichen Jahren eine große Expertise in diesem spezifischen Feld aufgebaut hat, konnte die Auswahl der studentischen Hilfskräfte auf Personen fallen, die explizit Erfahrungen im Umgang mit der Annotation von E-Beratungsdaten im psychosozialen Kontext aufweisen.

Die von den studentischen Hilfskräften zusammengetragenen Daten wurden von erfahrenen Online-Beraterinnen hinsichtlich der Codier-Vorgaben überprüft. Grundlage für den Aufbau des Kategoriensystems bildet die Entwicklung und Anwendung eines Kategoriensystems in der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (MAYRING & FENZL, 2019). Mayring formuliert hier Anforderungen an Kategoriensysteme in der qualitativen Sozialforschung. Für den Zweck der Codierung eines Datensatzes im Machine-Learning-Umfeld wurde die Systematik daher vom Forschungsteam explorativ weiterentwickelt.

Alle generierten Textbeispiele wurden manuell gesichtet, gegebenenfalls modifiziert oder verworfen, wenn die Vorgaben nicht erfüllt waren. Sämtliche Daten sind synthetisch erstellt, sodass keine personenbezogenen Daten enthalten und dadurch die Regeln zum Datenschutz nicht relevant sind.

4.7 Beschreibung des Datensatzes

Das Kategoriensystem und der Datensatz wurden im Github-Repository der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm¹ veröffentlicht. Die Details können dort eingesehen werden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über das Kategoriensystem und die Anzahl der jeweils erstellten Beispieltexte.

Das finale Kategoriensystem umfasst 40 Beraterinnen- und 28 Klientinnen und Klienten-Kategorien, wobei der größte Teil jeweils auf die Wirkfaktoren entfällt. Das Kategoriensystem ist hierarchisch aufgebaut. Ein Beispiel für eine Kategorie auf Ebene vier ist die "Nachfrage zur Lebenslage", die im Ast "Wirkfaktoren – Analyse und Klärung der Probleme – Reflexion (Sachverhalt)" zu finden ist. Diese spezielle Kategorie ist darüber hinaus weiter nach der Art der Nachfrage (soziale Beziehungen, berufliche Situation, Gesundheit etc.) unterteilt. Die meisten Kategorien wurden aber auf Ebene vier ohne weitere Unterteilung definiert.

Die erste Version des GeCCo-Datensatzes umfasst insgesamt über 2800 Textbeispiele für diese 68 Kategorien. Die meisten Daten entfallen dabei auf die jeweilige Oberkategorie "Wirkfaktoren", da diese im Focus der Analyse steht und sehr fein unterteilt ist. Abbildung 2 zeigt die Datenverteilung der Kategorien im Bereich "Wirkfaktoren". Wie deutlich zu erkennen ist, sind die Daten nicht gleichmäßig auf die Kategorien verteilt. Das liegt hauptsächlich daran, dass die Äußerungen in den Beratungsdialogen in der Realität auch nicht gleichverteilt sind. Um durch ein Modell auch seltene Kategorien gut erkennen zu können, wären noch mehr Trainingsdaten wünschenswert. Nach entsprechenden Tests ist daher geplant, die Daten punktuell zu erweitern.

¹ <https://github.com/th-nuernberg/gecco-dataset>

Typ	Kategorie Ebene 1	Kategorie Ebene 2	Anzahl Kategorien	Anzahl Texte
Berater	Formalitäten am Anfang	Formalitäten am Anfang	2	213
	Wirkfaktoren	Analyse und Klärung der Probleme	13	879
		Analyse und Vereinbarung von Beratungszielen	2	56
		Erzeugung von Motivation	4	131
		Ressourcenaktivierung	5	117
		Hilfe Problembewältigung	8	71
	Formales zum Abschluss		2	62
Andere Aussagen		4	19	
	Gesamt		40	1548
Klient	Formalitäten am Anfang	Formalitäten am Anfang	4	171
	Wirkfaktoren	Analyse und Klärung der Probleme	8	439
		Analyse und Vereinbarung von Beratungszielen	2	94
		Erzeugung von Motivation	2	76
		Ressourcenaktivierung	2	64
		Hilfe Problembewältigung	6	282
	Formales zum Abschluss		2	70
Andere Aussagen		2	59	
	Gesamt		28	1255

Tabelle 1: Oberste Ebenen des Kategoriensystems

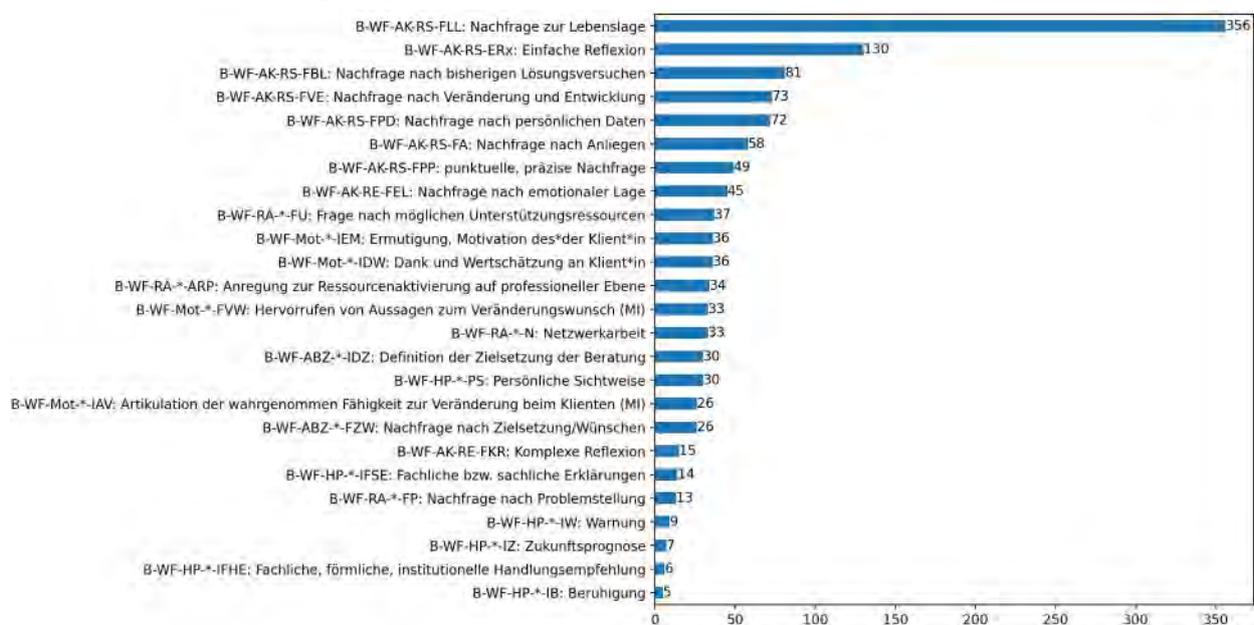


Abbildung 2: Datenverteilung in der Oberkategorie "Wirkfaktoren". Bild: Jens Albrecht

Um einen Eindruck davon zu bekommen, wie die Textbeispiele aussehen, seien hier zwei Beispiele aufgeführt:

- "Es ist ganz normal, dass ein junger Mensch während der Pubertät beginnt, sexuelle Wünsche und Vorstellungen zu entwickeln."
- Die Beratenden-Äußerung ist der Kategorie "Wirkfaktoren (WF); Hilfe, Problembewältigung (HP); Fachliche beziehungsweise sachliche Erklärungen" zugeordnet, zu der bisher nur 14 Trainingsbeispiele bestehen.
- "Es geht mehr um meinen Bruder als um mich."

Diese Äußerung ist ein Beispiel aus der Kategorie "Formalitäten am Anfang; Sorge um andere Person".

Die Texte sind meistens um die 100 Zeichen lang. Abbildung 3 zeigt Box-Plots der Werteverteilung der Textlängen pro Oberkategorie für Beratende und Klientinnen und Klienten. Dabei wird deutlich, dass die Schwankungsbreite bei den Äußerungen aus dem Bereich "Wirkfaktoren" erwartungsgemäß am größten ist.

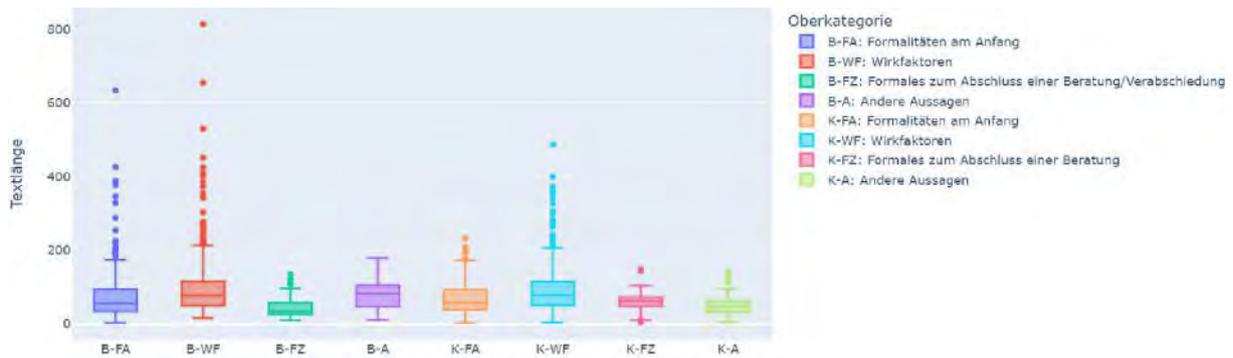


Abbildung 3: Längenverteilung der Beispieltex-te. Bild: Jens Albrecht

4.8 Training mittels Transfer Learning

Ein wesentliches Projektziel war die Erstellung und Veröffentlichung eines mit diesen Daten trainierten Modells. In der Vergangenheit konnte bereits gezeigt werden, dass Transformer-basierte Modelle gut dafür geeignet sind (GRANDEIT U. A., 2020). Die Grundidee beim Training ist es, ein mit sehr vielen Textdaten vortrainiertes Modell als Basis zu nehmen und mit den eigenen Daten weiter zu trainieren. Dieser Prozess wird auch als Transfer Learning bezeichnet.

Als Basis-Modelle wurden verschiedene Modelle professioneller Institutionen ausgewählt, die mit deutschsprachigen Texten trainiert wurden. Konkret wurden ein Basismodell des Münchner Digitalisierungszentrums (MDZ) der Bayerischen Staatsbibliothek sowie drei Modelle der Firma deepset.ai für das Fine-Tuning mit den GeCCo-Daten verwendet.

Basismodell	GeCCo-Modell	Parameter	Accuracy	F1
dbmdz/bert-base-german-uncased	bert-base-german-counseling-gecco	110Mio.	0,70	0,45
deepset/gelectra-large	gelectra-large-german-counseling-gecco	336 Mio.	0,73	0,46
deepset/gbert-large	gbert-large-german-counseling-gecco	336 Mio.	0,78	0,66
deepset/gbert-base	gbert-base-german-counseling-gecco	110 Mio.	0,72	0,51

Tabelle 2: Ergebnisse des Fine-Tunings mit den GeCCo-Daten

Tabelle 2: Ergebnisse des Fine-Tunings mit den GeCCo-Daten zeigt eine Übersicht über die verglichenen Modelle und die damit erreichten Ergebnisse. Das beste Ergebnis wurde mit gbert-large, einem mit deutschen Texten trainierten Modell basierend auf dem BERT-Modell von Google (DEVLIN U. A., 2019), erreicht. Die Accuracy, also der Anteil der korrekt erkannten Kategorien auf den 20 Prozent Testdaten liegt hier bei sehr guten 75 Prozent. Bei schiefen Verteilungen ist die Accuracy aber nur bedingt aussagekräftig, da die Klassen gewichtet mit der Anzahl der Beispiele in die Kennzahl eingehen und somit die schlechte Erkennung von Klassen mit wenig Beispieldaten kaum ins Gewicht fällt. Eine bessere Aussage liefert in diesem Fall der F1-Score, der auch den Recall (Trefferquote) mitberücksichtigt. Mit 0,66 ist dieser Wert bei gleicher Gewichtung aller Klassen (F1 Macro) trotz der schiefen Datenverteilung überraschend gut. Tatsächlich werden auch Kategorien mit sehr wenigen Trainingsdaten relativ gut erkannt, wie Tabelle 3 zu entnehmen ist.

Kategorie	Precision	Recall	F1	Support
B-A-*-*UB-* Unpassende Bemerkung	0.50	0.33	0.40	3
B-FA-*-*G-* Gesprächseröffnung	0.92	0.92	0.92	25
B-FA-*-*Mod-* Moderation	0.89	0.89	0.89	18
B-FZ-*-*APR-* Angebot zur Nutzung der prof. Ressourcen des*der Berater*in	0.67	1.00	0.80	2
B-WF-ABZ-*FZW-* Nachfrage nach Zielsetzung/Wünschen	0.25	0.40	0.31	5
B-WF-ABZ-*IDZ-* Definition der Zielsetzung der Beratung	1.00	1.00	1.00	6
B-WF-AK-RE-FEL-* Nachfrage nach emotionaler Lage	0.73	0.89	0.80	9
B-WF-AK-RE-FKR-* Komplexe Reflexion	0.50	0.33	0.40	3
B-WF-AK-RS-ERx-* Einfache Reflexion	0.91	0.81	0.86	26
B-WF-HP-*IFSE-* Fachliche beziehungsweise sachliche Erklärungen	1.00	1.00	1.00	3
B-WF-RA-*FU-* Frage nach möglichen Unterstützungsressourcen	0.71	0.71	0.71	7
B-WF-RA-*N-ARFa Netzwerkarbeit Ressourcenaktivierung auf Familienebene	1.00	1.00	1.00	5
B-WF-RA-*N-ARFr Netzwerkarbeit Ressourcenaktivierung auf Freundesebene	1.00	1.00	1.00	1

Tabelle 3: Auszug aus den Detail-Ergebnissen (Classification Report) der einzelnen Kategorien auf den Testdaten

Alle genannten Modelle wurden auf den Huggingface Model-Hub hochgeladen. Huggingface ist ein amerikanisches Unternehmen, das zum einen Software für maschinelles Lernen entwickelt und zum anderen einen stark frequentierten kostenlosen Marktplatz für Modelle und Daten bereitstellt. Die GeCCo-Modelle stehen unter <https://huggingface.co/th-nuernberg> zum Abruf und zum Test zur Verfügung.

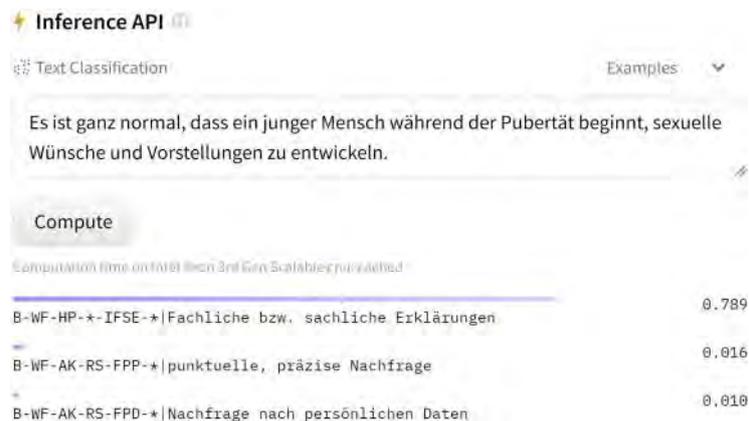


Abbildung 4: Inference API zum Testen von Modellen. Bild: huggingface.co

Das beste Modell kann auf <https://huggingface.co/th-nuernberg/gbert-large-german-counseling-gecco> direkt ausprobiert werden. Abbildung 4 zeigt die Vorhersage für Beratenden-Äußerung aus dem vorherigen Abschnitt. Das Modell klassifiziert die Äußerung mit hoher Wahrscheinlichkeit korrekt in die Kategorie "Fachliche beziehungsweise sachliche Erklärungen".

4.9 Zusammenfassung der Ergebnisse und weitere Schritte

Das Kategoriensystem, das im Rahmen dieses Projektes verschiedene bestehende Systeme und Beratungsansätze integriert, ist für die sozialwissenschaftliche Onlineberatungsforschung eine große Bereicherung. Neben der Codierung des GeCCo-Datensatzes ermöglicht dieses Instrument auch in zukünftigen Forschungsprojekten eine umfangreiche Codierung von Onlineberatungstexten. So liegt nun ein Standard vor, der vergleichbare Ergebnisse bei der Erforschung verschiedener Quellenbestände zur psychosozialen Onlineberatung ermöglicht. Durch den damit erstellten Datensatz und das trainierte Modell stellt das GeCCo-Projekt der Fachwelt ein Toolset zur Verfügung, mit dem auch andere Forschungsgruppen Onlineberatungstexte mit Hilfe von Machine Learning analysieren können. So ist die Grundlage für umfangreiche Forschungsprojekte in diesem Bereich gelegt.

Auch wenn durch die erstellten Modelle aktuell bereits mehr als zufriedenstellende Ergebnisse erreicht werden, ist hier noch Verbesserungspotenzial vorhanden. So kann durch die Erstellung oder Annotation

weiterer Beispieldaten in eher unterrepräsentierten Kategorien die Trefferquote wahrscheinlich deutlich gesteigert werden. Geplant ist darüber hinaus die Untersuchung generativer Transformer-Modelle (wie zum Beispiel die GPT-Modelle) für die Generierung weiterer Trainingsdaten, beziehungsweise direkt für die Klassifikation ohne eigenes Training (Few-Shot-Learning, vgl. (BROWN u. a., 2020)).

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Im Bereich der deutschsprachigen sozialen Arbeit und Onlineberatung kommen KI-unterstützte Ansätze nach wie vor kaum zum Einsatz. Sie werden in großen Teilen der Community als neue Herausforderung wahrgenommen (SCHRÖDTER & BASTIAN, 2019) und eher selten als Chance für die fachliche Weiterentwicklung begriffen. Auch wenn aktuelle Publikationen hier allmählich eine Änderung der Bewertung erkennen lassen (LEHMANN & STIELER, 2022), sind Umsetzungen von KI-basierten Verfahren selten. Ein großes Problem besteht in der Verfügbarkeit von Trainingsdaten. Mit dem nun vorliegenden Datensatz wird die Untersuchung innovativer Anwendungsfelder durch einen breiten und vor allem interdisziplinären Kreis von Forschenden ermöglicht. Die Etablierung dieses neuen Datensatzes stellt demnach eine bedeutsame Innovation für Forschende im deutschsprachigen Raum und ein Novum dar.

Die Publizierung ist als erste deutschsprachige Referenz im Themenbereich als Grundlageninvestition zu werten, die einen wissenschaftlichen Ruf begründet. Der entstehende Datenkorpus kann vielschichtig beforscht und Grundlage für neue Forschungsfragen werden. Beispielhafte Fragestellungen sind die Untersuchung von Wirkfaktoren in der Beratung, sprachlichen Mustern, Persönlichkeitsmerkmalen, emotionalen Ausnahmezuständen oder gefährdender Faktoren (Suizid, Kindeswohl etc.).

Jede Publikation, die diesen Datensatz verwendet, ergibt eine weitere Referenz für die Forschungsaktivitäten an unserer Hochschule. Im Fortgang kann der Datensatz vernetzt werden, indem weitere Forschende die Daten ergänzen und adaptieren. Datensatz und Modell sind dabei nicht nur für die sozialwissenschaftliche Forschung interessant, sondern erweitern auch das Spektrum an Szenarien für die Untersuchung maschineller Lernverfahren auf natürlichsprachlichen Texten allgemein.

Das Projektergebnis kann als Referenz für dieses Forschungsgebiet im deutschsprachigen Raum dienen. Es schafft ebenfalls die Voraussetzungen für die Beantragung von Anschlussforschung im Rahmen der neuen DFG-Förderlinie für HAW sowie für weitere Förderprogramme zur Veränderung der (sozialen) Arbeitswelt durch Digitalisierung (BMBF, BMFSFJ, Stiftungen) oder zur Digitalisierung und Inklusion vulnerabler Zielgruppen (Bildungsferne, Menschen mit Einschränkungen) (BMAS, BMG). Praxispartner*innen aus unterschiedlichen Beratungsfeldern können über das Institut für E-Beratung sowohl zur Datenbereitstellung als auch als praxisnahe Anwendende für wesentliche Fragestellungen eingebunden werden.

Die finale Datenbank wird Studierenden beider Fakultäten – Sozialwissenschaften und Informatik – vorgelegt. Sie werden aktiv ermutigt, daran zu forschen und die Entwicklung weiterer Datensätze und Modelle voranzutreiben. Konkret ist bereits die Einbindung in Lehrveranstaltungen zur Wissenschaft der Sozialen Arbeit geplant, in der Studierende der Sozialen Arbeit zusammen mit Mitarbeitenden des Instituts für E-Beratung Fragestellungen der sozialen Arbeit anhand dieses Datensatzes und weiterer Modelle aus dem Feld der künstlichen Intelligenz erproben. So werden niedrigschwellig auch außerhalb der Informatik Kompetenzen und Erfahrungen im Umgang mit künstlicher Intelligenz bei zukünftigen Fachkräften der Sozialen Arbeit vermittelt. Weiterhin können durch studentische Arbeiten neue Datensätze entstehen oder der bestehende Datensatz könnte angereichert werden. Denkbar wären hier zum Beispiel ein E-Beratungsdatsatz zu den Themen Bildung oder Gesundheit. Es ist geplant, die Ergebnisse jeweils in Arbeiten mit technischem und sozialwissenschaftlichem Fokus zu publizieren. Es wird auf kostenfreien elektronischen Zugriff (Open Access) geachtet.

6 Literatur

- ALBRECHT, JENS; LEHMANN, ROBERT; ZAUTER, SIGRID; INSTITUT FÜR E-BERATUNG: *Digitale Assistenz in der psychosozialen Beratung: Projekt-Abschlussbericht; 9.2019-2.2021*: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, 2021
- ALTHOFF, TIM; CLARK, KEVIN; LESKOVEC, JURE: Large-scale Analysis of Counseling Conversations: An Application of Natural Language Processing to Mental Health. In: *Transactions of the Association for Computational Linguistics* Bd. 4 (2016), S. 463– 476
- BERTAGNOLLI, NICOLAS: *Counsel chat: Bootstrapping high-quality therapy data*. URL <https://towardsdatascience.com/counsel-chat-bootstrapping-high-quality-therapy-data-971b419f33da>. – Towards Data Science
- BROWN, TOM B.; MANN, BENJAMIN; RYDER, NICK; SUBBIAH, MELANIE; KAPLAN, JARED; DHARIWAL, PRAFULLA; NEELAKANTAN, ARVIND; SHYAM, PRANAV; u. a.: Language Models are Few-Shot Learners. In: *Proceedings of 34th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. Vancouver, Canada, 2020
- CAO, JIE; TANANA, MICHAEL; IMEL, ZAC E.; POITRAS, ERIC; ATKINS, DAVID C.; SRIKUMAR, VIVEK: Observing Dialogue in Therapy: Categorizing and Forecasting Behavioral Codes, arXiv (2019). – arXiv:1907.00326 [cs]
- DEMASI, ORIANNA; LI, YU; YU, ZHOU: A Multi-Persona Chatbot for Hotline Counselor Training. In: *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2020*. Online: Association for Computational Linguistics, 2020, S. 3623–3636
- DEVLIN, JACOB; CHANG, MING-WEI; LEE, KENTON; TOUTANOVA, KRISTINA: BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. In: *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the ACL*. Minneapolis, Minnesota: Association for Computational Linguistics, 2019, S. 4171–4186
- ENGELHARDT, EMILY M.: *Lehrbuch Onlineberatung. 2., erweiterte Auflage* 2021. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 2021 – ISBN 978-3-525-71155-2
- GHANEM, CHRISTIAN; ECKL, MARKUS; LEHMANN, ROBERT: Big Data und Forschungsethik in der Sozialen Arbeit. In: *EthikJournal* Bd. 8 (2022), Nr. 1
- GRANDEIT, PHILIPP; HABERKERN, CAROLYN; LANG, MAXIMILIANE; ALBRECHT, JENS; LEHMANN, ROBERT: Using BERT for Qualitative Content Analysis in Psychosocial Online Counseling. In: *Proceedings of the Fourth Workshop on Natural Language Processing and Computational Social Science*. Online: Association for Computational Linguistics, 2020, S. 11–23
- GRAWE, KLAUS 1943-2005: *Psychologische Therapie*: Hogrefe, Verlag für Psychologie, 1998 – ISBN 978-3-8017-0978-5
- HILDEBRAND, ANJA; WEISS, MAREN; BRAUN-SCHARM, HELLMUTH; STEMMLER, MARK: *Evaluierung [U25] - Evaluierung der Online-Suizidpräventions-Beratung*: FAU Erlangen-Nürnberg, 2020
- HORCH, KERSTIN: Suche von Gesundheitsinformationen im Internet – Ergebnisse der KomPaS-Studie (2021)
- LAMNEK, SIEGFRIED; KRELL, CLAUDIA: *Qualitative Sozialforschung: Mit Online-Materialien*. 6., vollständig überarbeitete Edition. Weinheim Basel: Beltz, 2016 – ISBN 978-3-621-28269-7
- LEHMANN, R; STIELER, M: Chancen und Risiken KI gestützter Evaluationsmethoden textbasierter Kommunikation. In: *Suchttherapie*, Bd. 23 (2022), Nr. S 01, S. S39_4. – S39_4
- LEHMANN, ROBERT; ALBRECHT, JENS; ZAUTER, SIGRID: Die Computerunterstützte Analyse Sozialwissenschaftlicher Texte – Ergebnisse des Forschungsprojekts „Casotex“. In: *Gegenwart und Zukunft sozialer Dienstleistungsarbeit: Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Sozialwirtschaft, Perspektiven Sozialwirtschaft und Sozialmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021 – ISBN 978-3-658-32555-8

- LEHMANN, ROBERT; ALBRECHT, JENS; ZAUTER, SIGRID; INSTITUT FÜR E-BERATUNG: *CaSoTex, Computerunterstützte Analyse Sozialwissenschaftlicher Texte*: Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, 2020
- LIU, SIYANG; ZHENG, CHUJIE; DEMASI, ORIANNA; SABOUR, SAHAND; LI, YU; YU, ZHOU; JIANG, YONG; HUANG, MINLIE: Towards Emotional Support Dialog Systems. In: *Proceedings of the 59th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics and the 11th International Joint Conference on Natural Language Processing (Volume 1: Long Papers)*. Online: Association for Computational Linguistics, 2021, S. 3469–3483
- MALHOTRA, GANESHAN; WAHEED, ABDUL; SRIVASTAVA, ASEEM; AKHTAR, MD SHAD; CHAKRABORTY, TANMOY: Speaker and Time-aware Joint Contextual Learning for Dialogue-act Classification in Counselling Conversations. In: *Proceedings of the Fifteenth ACM International Conference on Web Search and Data Mining*. Virtual Event AZ USA: ACM, 2022 — ISBN 978-1-4503-9132-0, S. 735–745
- MAYRING, PHILIPP; FENZL, THOMAS: Qualitative Inhaltsanalyse. In: BAUR, N.; BLASIUS, J. (Hrsg.): *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2019 — ISBN 978-3-658-21308-4, S. 633–648
- MILLER, WILLIAM R.; MOYERS, THERESA B.; ERNST, DENISE; AMRHEIN, PAUL: Manual for the Motivational Interviewing Skill Code (MISC), Version 2.1. unpublished, 2008
- MILLER, WILLIAM R.; ROLLNICK, STEPHEN: *Motivierende Gesprächsführung: Motivational Interviewing: 3. Auflage des Standardwerks in Deutsch*: Lambertus-Verlag, 2015. — Google-Books-ID: ffv1DwAAQBAJ — ISBN 978-3-7841-2546-6
- MODE-SCHEIBEL, BRIGITTE: Analyse verschiedener Beratungsansätze und Interventionen in der psychosozialen Onlineberatung. In: e-beratungsjournal.net Bd. 10. Jahrgang (2014), Nr. Heft 2, Artikel 4, S. 88–102
- PAULUS, CHRISTOPH: *Empathie und die Big Five* (2016)
- RAT FÜR SOZIAL- UND WIRTSCHAFTSDATEN (RATSWD): Erhebung und Nutzung unstrukturierter Daten in den Sozial-, Verhaltens- und Wirtschaftswissenschaften. In: *RatSWD Output Paper Series* (2023)
- REINDL, RICHARD: Zum Stand der Onlineberatung in Zeiten der Digitalisierung. In: *E-Beratungsjournal*, Bd. 14 (2018), S. 16–26
- SCHLAPBACH, MARTINA; ETTLIN, RICARDA; SPIESS, MANUELA; RUFLIN, REGULA: *Anwendung von Wirkfaktoren in der E-Mail-Beratung von SafeZone.ch* (Schlussbericht): Bundesamt für Gesundheit, Sektion Prävention in der Gesundheitsversorgung, 2018
- SCHRÖDTER, MARK; BASTIAN, PASCAL: Risikodiagnostik durch Big Data Analytics im Kinderschutz. In: *ARCHIV für Wissenschaft und Praxis der sozialen Arbeit* (2019), Nr. 02, S. 40–49
- STIELER, MARA: Zugänge, Einflussfaktoren und Effekte der psychosozialen Onlineberatung von Jugendlichen - eine empirische Erhebung unter User*innen der Plattform Jugendnotmail (2022)
- STIELER, MARA; LIPOT, SARAH; LEHMANN, ROBERT: Zum Stand der Onlineberatung in Zeiten der Corona Krise. Entwicklungs- sozialund Veränderungsprozesse der Onlineberatungslandschaft. In: *Fachzeitschrift für Onlineberatung und computervermittelte Kommunikation*, Bd. 18 (2022), Nr. 1, S. 50–65
- VASWANI, ASHISH; SHAZEER, NOAM; PARMAR, NIKI; USZKOREIT, JAKOB; JONES, LLION; GOMEZ, AIDAN N; KAISER, ŁUKASZ; POLOSUKHIN, ILLIA: Attention is All you Need. In: GUYON, I.; LUXBURG, U. V.; BENGIO, S.; WALLACH, H.; FERGUS, R.; VISHWANATHAN, S.; GARNETT, R. (Hrsg.): *Advances in Neural Information Processing Systems*. Bd. 30: Curran Associates, Inc., 2017
- WATSON, JEANNE C.: Reassessing Rogers' necessary and sufficient conditions of change. In: *Psychotherapy: Theory, Research, Practice, Training* Bd. 44 (2007), Nr. 3, S. 268–273
- WU, ZIXIU; BALLOCCU, SIMONE; KUMAR, VIVEK; HELAOU, RIM; REFORGIATO RECUPERO, DIEGO; RIBONI, DANIELE: Creation, Analysis and Evaluation of AnnoMI, a Dataset of Expert-Annotated Counselling Dialogues. In: *Future Internet* Bd. 15 (2023), Nr. 3, S. 110

- WU, ZIXIU; BALLOCCU, SIMONE; KUMAR, VIVEK; HELAOUI, RIM; REITER, EHUD; REFORGIATO RECUPERO, DIEGO; RIBONI, DANIELE: Anno-MI: A Dataset of Expert-Annotated Counselling Dialogues. In: *ICASSP 2022 - 2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Singapore, Singapore: IEEE, 2022 — ISBN 978-1-66540-540-9, S. 6177–6181
- XIAO, BO; CAN, DOĞAN; GIBSON, JAMES; IMEL, ZAC E.; ATKINS, DAVID C.; GEORGIU, PANAYIOTIS; NARAYANAN, SHRIKANTH S.: Behavioral Coding of Therapist Language in Addiction Counseling Using Recurrent Neural Networks. In: *Interspeech 2016: ISCA, 2016*, S. 908–912
- YU, JIHYE; LEE, SUKYUNG; KIM, MIRAN; LIM, KIYOUNG; CHANG, KIHONG; LEE, MIJIN: Relationships Between Perspective-Taking, Empathic Concern, and Self-rating of Empathy as a Physician Among Medical Students. In: *Academic Psychiatry* Bd. 44 (2020), Nr. 3, S. 316–319
- ZAUTER, SIGRID; LEHMANN, ROBERT: Schwer auffindbare Beratungsangebote in der psychosozialen Onlineberatung. In: FREIER, C.; KÖNIG, J.; MANZESCHKE, A.; STÄDTLER-MACH, B. (Hrsg.): *Gegenwart und Zukunft sozialer Dienstleistungsarbeit: Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Sozialwirtschaft, Perspektiven Sozialwirtschaft und Sozialmanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021 — ISBN 978-3-658-32556-5, S. 129–140

Rad und Bahn – intermodale Verknüpfung auch im ländlichen Raum

Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohlinger

Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Schienenverkehrswesen

Robert Künzler, B.Sc.

Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Schienenverkehrswesen

Andreas Vogler

Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Schienenverkehrswesen

Zusammenfassung:

Um in ländlichen Gebieten eine bessere Fahrradbindung an die Bahn zu erreichen, sind verschiedene Maßnahmen erforderlich, die sowohl die Infrastruktur als auch die Organisation des gesamten Verkehrssystems betreffen. Ein vielversprechender Ansatz ist die Schaffung von sogenannten MobilityHubs. Diese dienen als dezidierte Schnittstellen zwischen dem Rad-, Schienen- und Busverkehr sowie unterschiedlichen Dienstleistungen und Angeboten für Radfahrer und „Mikromobilisten“. Die Forschergruppe zielt dabei auf die Einrichtung eines Reallabors mit MobilityHubs ab, um dieses Konzept in der Fränkischen Schweiz anzuwenden und zu verifizieren.

1 Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Schienenverkehrswesen
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohlinger
Projektteam	Robert Künzler, B.Sc., Andreas Vogler
Kontakt Daten Projektleitung	matthias.bohlinger@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage und Ziele des Forschungsprojekts

Viele ländliche Gebiete wie das Wiesenttal in der Fränkischen Schweiz stehen vor der großen Herausforderung von einerseits schwindenden Bevölkerungsanteilen, einer bescheidenen Anbindung an den ÖPNV und andererseits einem zunehmenden, motorisierten Individualverkehr. Aber die Möglichkeit der selbstbestimmten Mobilität auf dem Land für bestimmte Mobilitätsgruppen (Kinder, Jugendliche, Ältere) und der Wahlfreiheit für alle anderen ist durch mangelhafte Angebote des ÖPNV beschränkt. Gleichzeitig fordert das Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung eine Verdoppelung der Fahrgastzahlen im ÖPNV. Hier wird vor allem auf den Fernverkehr und den urbanen Raum gesetzt. Gerade die in der Stadt hauptsächlich von privaten Playern eingesetzte Digitalisierung und Mikromobilität bieten jedoch für die Mobilität im ländlichen Raum die Chance eines nachhaltigen, ökologischen Betriebs und attraktiven Angebots mit dem SPNV als Rückgrat der öffentlichen Mobilität.

Jedoch ist in ländlichen Räumen der Schienenpersonennahverkehr (SPNV) – sofern noch vorhanden – häufig eine marginale Größe. Oft mangelt es auch an entsprechenden Busverbindungen für die Feinverteilung. Zwar könnte man mit neuen Formen der Mikromobilität wie E-Bikes und E-Scootern das Einzugsgebiet für den ÖPNV ausweiten. Dieses Potenzial wird allerdings durch eine unbefriedigende Infrastruktur an Radwegen und gesicherten Fahrradabstellanlagen konterkariert. Der Unterhalt und die Infrastruktur von Bahnhöfen im ländlichen Raum wurden über die letzten Jahrzehnte durch die 1994 angestoßenen Bahnreform auf ein Minimum reduziert. Ob sich dies durch die erneute Bahnreform (InfraGO) ab 2024 ändert, muss sich noch weisen – umso mehr, nachdem der Klima-Transformationsfond vom Bundesverfassungsgericht gekippt wurde, aus dem große Teile für die Sanierung der Bahninfrastruktur hätten finanziert werden sollen.

2.1 Vor allem in ländlichen Regionen ist in der Verkehrspolitik keine richtungsweisende Strategie erkennbar.

Während in den Städten die Mobilitätswende bereits begonnen hat, werden ländliche Regionen immer abhängiger vom eigenen Pkw – auch oder weil sich der ÖPNV zurückzieht und die Wege immer länger werden. Dabei kann man sich nicht auf privatwirtschaftliche Initiativen wie der Sharing-Economy oder Ride-Pooling verlassen, denn in der Fläche sind die meisten dieser Angebote nicht wirtschaftlich. Auch das automatisierte Fahren als Baustein für eine ländliche Mobilitätswende ist nicht absehbar, um damit einen notwendigen Paradigmenwechsel im ländlichen S/ÖPNV voranzutreiben (Vogler & Künzler, 2021).

2.2 Gerade durch die unzureichend angebotenen ländlichen Räume entstehen viele der innerstädtischen Verkehrsprobleme.

Das Mobilitätsangebot hat einen mitentscheidenden Einfluss auf den Zugang zu Arbeit, Bildung und Versorgung. Auch das kulturelle und soziale Leben stellt einen wesentlichen Faktor für die Lebensqualität der Menschen dar und ist ein wichtiger Standort- und Wirtschaftsfaktor für jede Region. Mit der

Verbesserung der Mobilität in ländlichen Regionen kann ein Beitrag für mehr Teilhabe der Bevölkerung, zur Stärkung der regionalen Wettbewerbsfähigkeit sowie zum Klimaschutz geleistet werden.

2.3 Auf der Seite des S/ÖPNV stehen schwer verständliche und dünne Fahrplanangebote

...mit fehlender Flexibilität, die für ein geringes Ansehen und eine geringe Nutzung sorgen. In peripheren Regionen ist der ÖPNV teilweise bis auf den Schülerverkehr reduziert. Die **unverständlichen, von Klein-staaterei getriebenen Tarifsysteme** wurden immerhin für Benutzer des Deutschlandtickets entschärft, nicht hingegen für Nutzer, die nur gelegentlich mal ihr Auto stehen lassen möchten.

Den eigenen Pkw aufzugeben, um zum ÖPNV zu wechseln, ist unter diesen Voraussetzungen keine Alternative. Auf dem Land ist es über die Jahre zu einer **Henne-Ei-Problematik** gekommen: Der ÖPNV verzeichnet geringe Nutzerzahlen wegen des demographischen Wandels, Urbanisierung und steigenden Pkw-Besitzes. In Folge reduziert der ÖPNV sein Angebot, das wiederum zu noch geringeren Nutzerzahlen führt.

Die Verkehrswende, die heute nach dem Konzept „Mobility-as-a-Service“ (MaaS) nutzerorientiert verstanden und unter Einsatz digitaler Technik und Plattformen betrieben wird, findet durch die gegebene räumliche Verdichtung vorwiegend im urbanen Kontext statt. Während dort immer mehr Einwohner bereits auf die Nutzung des Autos verzichten können und wollen, waren es beim Modal Split in kleinstädtisch und dörflich geprägten Räumen im Jahr 2017 immer noch 66 Prozent die aktiv oder als Mitfahrende das Auto nutzten (CLAUDIA & KUHNIMHOF, TOBIAS, 2018). Eine Initiative im ländlichen Raum erscheint daher nicht nur geboten, es könnten auch deutlich größere Effekte zugunsten des Klimas erzielt werden als in der Stadt (NEUE MOBILITÄT UND MOBILITÄTS-HUBS IM LÄNDLICHEN RAUM, 2023). Ob diese Behauptung stimmt, müsste allerdings überprüft werden. In Deutschland leben 39 Prozent der Menschen in Städten, 40,7 Prozent in Kleinstädten oder Vororten und 20,3 Prozent in ländlichen Gebieten, davon 15 Prozent in Dörfern mit weniger als 5.000 Einwohnern. Allerdings ist die Erreichbarkeit zum ÖPNV in Klein- und Mittelstädten gerade in Bayern (siehe Abbildung 1) sehr unterentwickelt („ERREICHBARKEITSRANKING“, 2023).

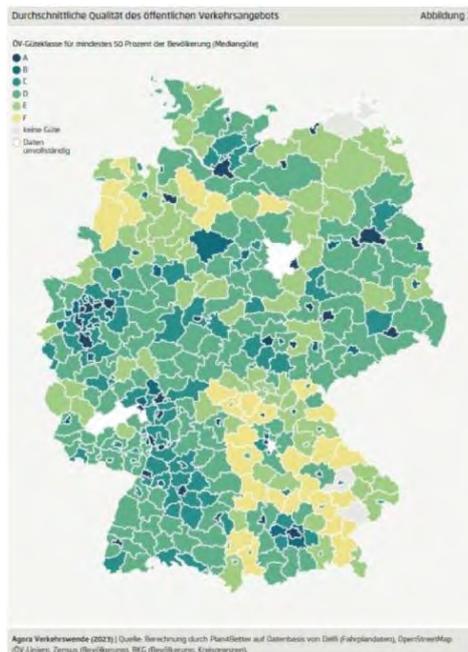


Abbildung 1: Die mangelhafte Güteklasse der ÖPNV-Versorgung im ländlichen Raum ist vor allem in Bayern auffällig. Bild: Agora Verkehrswende

Für eine erfolgreiche Verkehrsverlagerung auf den ÖPNV sind jedoch die Attraktivität des ÖPNV-Angebots, einfache und angemessene Tarife sowie eine optimierte Verknüpfung mit anderen Verkehrsmitteln von entscheidender Bedeutung (NAUMANN, THOMAS, 2022). Durch eine intermodale Verknüpfung wird das Potenzial für die Mikromobilität gehoben, die durch eine adäquate Infrastruktur in Form von MobilityHubs als tragendes Fundament in ländlichen Strukturen dienen kann.

2.4 Dimension, Bedeutung und Aktualität des Forschungsgegenstandes

Die Beeinflussbarkeit der obigen drei Faktoren liegt in unterschiedlichen Händen: Der SPNV wird in Bayern von der BEG, der übrige ÖPNV von den Landkreisen und kreisfreien Städten bestellt (Aufgabenträger). Der Tarif wird meist verbundweit festgelegt (Beispiel Verkehrsverbund Großraum Nürnberg VGN). Die verbleibende, direkte Einflussmöglichkeit für kreisangehörige Kommunen – den weitaus größten Teil aller Kommunen (*Kreisangehörige Gemeinde*, o. J.) – liegt somit bei der Optimierung der Verknüpfung. Hier rückt neben der Verknüpfung mit dem Pkw (P+R), dem Bus (siehe oben) und durch Bedarfsverkehre vor allem das Fahrrad und andere Formen der Mikromobilität in den Fokus.

Gerade in der Forschung und in aktuellen Förderausschreibungen wird die Aufwertung von Haltestellen im ländlichen Raum durch sogenannte Mobilitätsstationen oder MobilityHubs als eine zielführende Lösung diskutiert (NEUE MOBILITÄT UND MOBILITÄTS-HUBS IM LÄNDLICHEN RAUM, 2023) (BUNDESMINISTERIUM & FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, 2023). Der Fokus liegt auf der räumlichen Konzeption und der baulichen Infrastruktur der öffentlichen Verkehre – den Bahnhöfen und Haltestellen. In ländlichen Räumen sind insbesondere Bushaltestellen häufig von geringem funktionalem und gestalterischem Anspruch und bieten wenig Aufenthaltsqualität, zudem sind sie wegen einer Vielzahl von Akteuren und Zuständigkeiten nicht einheitlich gestaltet und besitzen einen geringen Wiedererkennungswert. Der Einsatz neuer Mobilität, insbesondere auch verbesserter Nahmobilität, bietet nun die Chance, das Haltestellensystem durch MobilityHubs zu ergänzen und aufzuwerten, wie dies im urbanen Umfeld bereits geschieht. Ein solcher Ansatz fehlt bislang für den ländlichen Raum.

Neben den Mobilitätsangeboten integrieren die Hubs Sekundärfunktionen wie Aufenthaltsmöglichkeiten, wodurch sie auch zu sozialen Orten und somit zu Ankerpunkten des öffentlichen Lebens werden können. Verkaufsautomaten erlauben eine minimale Grundversorgung ohne Fahrt zur nächsten Tankstelle. Die Integration von anbieteroffenen Paketstationen kann sowohl für Empfänger als auch Lieferanten interessant sein, indem diese wie die Verkaufsautomaten unnötige Liefer- und Hohlfahrten reduzieren, das Angebot erhöhen und den Treffpunktcharakter der MobilityHubs auch für Nicht-ÖPNV-Benutzer stärken.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Mit den Mitteln aus der Vorlauftforschung sollen folgende Forschungsfragen grundlegend geklärt, erste Lösungsansätze erarbeitet und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt werden. Dabei sollen im Hinblick auf weiter geförderte Forschungsvorhaben die Untersuchungen so gestaltet werden, dass in diesen die bisher gewonnenen Erkenntnisse in einem Reallabor angewandt und die zur Verfügung stehenden Angebote und die Nachfrage empirisch festgestellt und so auf andere ländliche Räume übertragen werden können.

Als erstes Erprobungsbeispiel soll die in der Metropolregion Nürnberg gelegene Wiesenttalbahn von Forchheim nach Ebermannstadt und ihrer Verlängerung nach Behringersmühle dienen. Die Kommunen (Stadt Ebermannstadt, Gemeinde Gößweinstein und andere), die „Integrierte Ländliche Entwicklung Fränkische Schweiz AKTIV“, Agilis (Eisenbahnverkehrsunternehmen) und die Dampfbahn Fränkische Schweiz (DFS; Eisenbahninfrastrukturbetreiber) haben ihre Unterstützung bereits fest zugesagt.

3.1 Problemstellungen

In ländlichen Gebieten besteht die Hauptproblematik bei der Mobilität und Verkehrswende darin, dass es oft an Infrastruktur, finanziellen und personellen Ressourcen und folglich an attraktiven Angeboten fehlt. Dadurch gibt es oft nur begrenzte Möglichkeiten für den öffentlichen Verkehr und eine starke Abhängigkeit von privaten Fahrzeugen. Zusätzlich gibt es möglicherweise auch nur wenig Zugang zu Ladestationen für Elektrofahrzeuge und alternativen Transportmöglichkeiten wie Sharing-Diensten, digital organisierte Mitfahrdienste oder Ride-Pooling. Oft fehlen wettergeschützte Fahrradabstellanlagen, sichere Radwege oder angemessene Wartehäuschen.

Ein weiteres Problem sind größere Distanzen zwischen den Zielen in ländlichen Gebieten, was die Umsetzung von effizienten und kostengünstigen Transportlösungen erschwert. Bei Distanzen von 4-6 km kommt eine fußläufige Verbindung nicht mehr in Frage. Für andere Formen wie der Mikromobilität sind solche Entfernungen grundsätzlich gut zu bewältigen.

Die Mobilität im Zusammenhang mit der angestrebten Verkehrswende im ländlichen Raum erfordert daher eine ganzheitliche Herangehensweise, die spezifischen Bedürfnisse und Herausforderungen der Regionen berücksichtigen, um nachhaltige, umweltfreundliche und sozial akzeptable Lösungen umzusetzen.

Obwohl der MIV auf dem Land von vielen und vor allem im Berufsverkehr als alternativlos betrachtet wird, gibt es doch ein großes Potenzial im Bereich der Besorgungs-, Freizeit-, sowie Bring- und Hohlfahrten. Laut dem Mikrozensus Mobilität in Deutschland aus dem Jahr 2017 werden etwa 29 Prozent aller Autofahrten im ländlichen Raum auf Strecken von weniger als zwei Kilometern zurückgelegt (CLAUDIA & KUHNIMHOF, TOBIAS, 2018)

3.2 Fragestellungen

Aus den oben genannten Aspekten ergeben sich untenstehende Fragestellungen.

- Wie kann die Haltestelleninfrastruktur so verändert werden, dass sie eine komfortable Verknüpfung mit Formen der Mikromobilität bietet, mit der die Abhängigkeit vom individuellen Auto reduziert werden kann?
- Wie können MobilityHubs dazu beitragen, die öffentliche Verkehrsanbindung in ländlichen Gebieten zu verbessern und sicherzustellen, dass die Bevölkerung Zugang zu wichtigen Dienstleistungen hat?
- Wie können innovative Technik und Mikromobilität, wie Sharing-Dienste, E-Scooter, E-Bikes und Lastenfahräder in ländlichen Regionen effektiv eingeführt und genutzt werden?
- Welche Rolle spielen Fahrradwege und Fußgängerinfrastruktur in der Förderung umweltfreundlicher Mobilität in ländlichen Gegenden, und wie können diese ausgebaut werden?
- Wie kann die Verkehrsplanung im ländlichen Raum dazu beitragen, den öffentlichen Nahverkehr attraktiver zu gestalten und gleichzeitig die individuelle Mobilität zu berücksichtigen?
- Welche Anreize und Förderprogramme sind notwendig, um den Umstieg auf umweltfreundliche Verkehrsmittel im ländlichen Raum zu unterstützen?
- Welche Auswirkungen haben MobilityHubs auf die Versorgung, das soziale Leben und Ortsidentifikation?
- Wie kann die Digitalisierung dazu beitragen, die Mobilität im ländlichen Raum zu verbessern, beispielsweise durch Ride-Sharing-Plattformen wie digitale Mitfahrbänke, Sharing-Angebote und Echtzeitinformationen für Reisende?
- Welche sozialen und kulturellen Aspekte und Hemmnisse sind bei der Umsetzung von MobilityHubs im ländlichen Raum zu beachten, um die Akzeptanz und Teilhabe der Bevölkerung zu fördern?

3.3 Ziele

Die Vorlaufforschung hat zum Ziel, Vorarbeiten zur Erforschung von Ursachen zur Abhängigkeit vom Automobil auf dem Land festzustellen und durch intelligente Lösungsansätze zu reduzieren. Alternative Angebote sind zu untersuchen und mithilfe eines Reallabors zu verifizieren. Dazu gehört die wesentliche Frage, wie durch Mikromobilität die "letzte Meile" zum SPNV und ÖPNV verbessert und deren Schnittstellen für die Reisenden attraktiver gestaltet werden können. Auch die Analyse von bestehenden Recherchen und die Durchführung eigener Umfragen sind Bestandteil dieser Vorlaufforschung, um das Mobilitätsverhalten im ländlichen Raum und spezifisch in der Fränkischen Schweiz besser zu erfassen und entsprechende Rückschlüsse zur Weiterentwicklung zu ziehen.

Zu diesem Zweck werden drei E-Bike-Ladestationen in der Verbandsgemeinde Kirchehrenbach in der Fränkischen Schweiz installiert und grafisch gestaltet, um im Sinne eines kleinen Reallabors festzustellen, wie dieses Angebot angenommen wird.

Im Sinne der Verwendung in weiteren Forschungsanträgen, die auf ein Reallabor abzielen, wurde ein Vorkonzept für ein mobiles MobilityHub-System entwickelt und dieses in Form eines Konzeptentwurfs visualisiert und in den Grundzügen spezifiziert. Diese Vorarbeiten sollen im nächsten Schritt für multidisziplinäre Förderanträge zur Umsetzung eines Reallabors verwendet werden. Dazu soll ein Planungsvorschlag für den Einsatz von MobilityHubs in der Modellregion der Fränkischen Schweiz erstellt werden. Konzeptionell wurden solche MobilityHubs in einer Projektskizze für die Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur „Transformationsinitiative Stadt-Land-Zukunft“ vom Forscherteam bereits vorgeschlagen.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Als Daten- und Diskussionsgrundlage dienen dem Forscherteam einerseits die Kenntnisse zur Lage der Mobilität in der Fränkischen Schweiz und anderen ländlichen Räumen, andererseits die aktuelle Studienlage und Projekte zur Mobilität in ländlichen Räumen. In diesem explorativen Forschungsansatz wurden immer öfter Einzelmaßnahmen und -forderungen beobachtet, die ohne die Einbindung in eine langfristige Strategie wenig Wirkung zeigen. Deshalb erscheint die Idee eines Reallabors mit dem Instrumentarium von MobilityHubs als besonders vielversprechend. Zum einen, da sich Maßnahmen direkt und mit unmittelbarem Nutzerfeedback bewerten lassen, zum anderen, da es erlaubt die Maßnahmen vor Ort zu kommunizieren. Das Reallabor hat dabei nicht nur einen forschenden, beobachtenden Charakter, sondern auch einen implementierenden mit entsprechender Wirksamkeitsanalyse und Anpassung der Maßnahme.

Im Rahmen dieses explorativen Forschungsansatzes wurden häufig Einzelmaßnahmen und -forderungen beobachtet, die ohne Einbindung in eine langfristige Strategie wenig Wirkung zeigen. Aus diesem Grund erscheint die Idee eines Reallabors mit dem Instrumentarium von MobilityHubs als besonders vielversprechend. Einerseits lassen sich hierdurch Maßnahmen direkt und mit unmittelbarem Nutzerfeedback bewerten. Andererseits ermöglicht es die Kommunikation der Maßnahmen vor Ort. Das Reallabor hat sowohl einen Forschungs- und Beobachtungscharakter als auch umsetzenden mit Iteration Wirksamkeitsanalyse und Anpassung der Maßnahme.

Unsere umfassenden und langjährigen Kenntnisse sowie Beziehungen und Kontakte in die Politik in der Fränkischen Schweiz ermöglichen unserem Forschungsteam in dieser Region bei entsprechender Förderung ein „Mobility-Reallabor“ aufzubauen.

4.1 Grundannahmen

Im Rahmen der Vorlaufforschung wurden verschiedene Grundannahmen recherchiert und erörtert. Grundannahmen deshalb, weil die Erfüllung einzelner Forderungen oft nicht zum gewünschten Resultat führt. Das nachfolgende Beispiel einer neuerstellten abschließbaren Fahrradanlage in Cadolzburg zeigt dies exemplarisch. In weiterer Forschung soll untersucht werden, welche ‚Grundannahmen‘ auch wirkliche Grundvoraussetzungen sind und in welcher minimalen Zusammenwirkung diese stehen müssen, um von den Nutzern als Verbesserung erkannt und angenommen zu werden.

Oft genannte Grundannahmen sowohl von Förderstellen als auch von Nutzern:

- **Ladestationen für E-Bikes bereitstellen:** Ziel sollte sein, an Bahnstationen Ladestationen für E-Bikes zu installieren, um die Nutzung von Elektrofahrrädern zu fördern und die Reichweite zu erhöhen.
- **Sichere, wettergeschützte Fahrradabstellplätze schaffen:** Ziel ist die Bereitstellung sicherer, überdachter und überwachter Abstellmöglichkeiten für Fahrräder und E-Bikes, um Diebstahl und Vandalismus zu verhindern.
- **Barrierefreiheit gewährleisten:** Die Radabstellplätze sollten barrierefrei gestaltet sein, um die Nutzung durch Menschen mit eingeschränkter Mobilität zu ermöglichen.
- **Fahrradboxen und -schränke anbieten:** Ziel ist die Bereitstellung von abschließbaren Fahrradboxen und -schränken an Bahnstationen, um Fahrräder vor Witterungseinflüssen und Diebstahl zu schützen.
- **Integration in den ÖPNV:** Die Fahrradabstellplätze sollten nahtlos in den öffentlichen Nahverkehr integriert sein, um die Kombination von Fahrrad und Bahn zu erleichtern. Das betrifft besonders sehr kurze Distanzen zwischen Abstellanlage und Bahnsteig.
- **Sharing-Dienste:** Mit einfachem Zugang zu Sharing-Diensten für E-Bike, E-Scooter und Lastenrad wie im urbanen Umfeld, die Hemmschwelle zur Nutzung der Mikromobilität senken
- **Erweiterte Öffnungszeiten:** Die Abstellmöglichkeiten sollten während der Betriebszeiten der Bahnstationen zugänglich sein und idealerweise auch außerhalb dieser Zeiten genutzt werden können.
- **Information und Navigation:** Fahrradfahrer sollten leicht Informationen über verfügbare Abstellanlagen und Ladestationen finden, um ihre Reise besser planen zu können.
- **MobilityHubs:** Mit einem durchgängig gestalteten System die Mikromobilität mit dem ÖPNV/SPNV verbinden und weitere Funktionen wie Logistik, Versorgung, Treffpunkte etc. integrieren.
- **Mobilitätsgarantie:** Eine Mobilitätsgarantie über die ganze Mobilitätskette der ÖPNV-Benutzung im Sinne von „Der Kunde ist König“ soll die Nutzung der Angebote so attraktiv wie möglich gestalten.
- **Multimodale Tickets und Tarife:** Ziel ist es, integrierte Ticketing-Systeme zu entwickeln, mit denen die Nutzung von Fahrrad und Bahn ein kostengünstiges und nahtloses Erlebnis wird.
- **Umweltaspekte berücksichtigen:** Bei der Bereitstellung von Ladestationen und Abstellplätzen sollten umweltfreundliche Techniken und nachhaltige Materialien verwendet werden.
- **Nutzerfeedback und Evaluation:** Regelmäßige Rückmeldungen von Nutzern sollten eingeholt werden, um die Qualität der Fahrradabbindung und der Abstellplätze kontinuierlich zu verbessern.
- **Integration und Kommunikation:** Die Angebote sollen dem Nutzer möglichst integriert und aus einer Hand in Erscheinung treten. Mit kommunikativen Maßnahmen sollen die Angebote vor allem an Autofahrer vermittelt werden.

4.2 Analyse einer neugebauten Fahrrad-Abstellanlage und mögliche Ursachen für deren Nicht-Nutzung

Viele neuerstellte Fahrradabstellanlagen zeugen leider davon, dass diese gutgemeinten Maßnahmen in der praktischen Umsetzung oftmals am Nutzer vorbeizielten. Beim ehemaligen Endbahnhof Cadolzburg an der Strecke nach Fürth, der noch vor wenigen Jahren zum Endhaltepunkt degradiert und sämtliche Gleisanlagen bis auf ein Gleis abgebaut wurden, gibt es eine neuerstellte Fahrradabstellanlage mit abschließbaren Metallboxen. Daneben befinden sich einige offene Radständer in Bügelform, ein Unterstand mit einer Bank-sitzgruppe sowie geschwungene Sitzbänke unter freiem Himmel. Die Nutzung der gesicherten Abstellboxen (siehe Abbildung 2) liegt im Wochendurchschnitt gerade bei nicht mal einem (1) Fahrrad pro Tag!



Abbildung 2: Kostenpflichtige, spärlich genutzte Fahrrad-Abstellboxen am Bahnhof Cadolzburg. Die Lage bedeutet einen wesentlich längeren Fußweg gegenüber der alten ungesicherten Abstellanlage. Bild: Matthias Bohlinger

Auf der gegenüberliegenden Seite des Gleises, das heißt, am direkten Zugang zum Bahnsteig befindet sich ein rege benutzter, seit langem bestehender Fahrradunterstand mit stabilen Bügeln zur Sicherung der Fahrräder mit eigens mitgebrachten Radschlössern. Die durchschnittliche Belegung beträgt nach unserer Beobachtung etwa neun bis zwölf Räder in den morgendlichen Stunden (siehe Abbildung 3).

Wir stellen fest, dass die Distanz der neuen Anlage mit etwa 250 m Fußweg deutlich zu weit vom Bahnsteig entfernt liegt. Allgemeine Empfehlungen gehen von einer akzeptablen Maximaldistanz von 80 m aus, was ein Großteil der geringen Nutzung der Neuanlage erklärt. Im Übrigen liegen die Autostellplätze in unmittelbarer Bahnsteignähe.



Abbildung 3: Bestehende gut belegte Fahrrad-Abstellanlage am Bahnsteig des Endhaltepunkts Cadolzburg. Bild: Matthias Bohlinger

4.2.1 Testen und Verifizieren von Grundannahmen

Wie obiges Beispiel zeigt, lässt sich durch sorgfältiges, neugieriges und hinterfragendes Beobachten einiges an Erkenntnis über das Nutzerverhalten gewinnen. Die Nutzerbefragung bringt für die Schaffung neuer erfolgreicher Produkte oft nur wenig, wie man aus dem Marketing weiß. Genau diese Lücke soll mit den hier vorgeschlagenen modularen und mobilen MobilityHubs geschlossen werden. Mit diesen lassen sich vor Ort verschiedene Angebote testen und verifizieren, ohne dass dafür langwierige Genehmigungsverfahren und teure Fundamente erforderlich sind. Dazu eignet sich die Grundidee eines Real-labors, das nicht nur beobachtende Forschung betreibt, sondern auch mit den Benutzern vor Ort interagiert und die Bewohner und Benutzer in Prozesse miteinbezieht.

4.3 Umfragen

Im Allgemeinen ist es schwierig, Menschen über ihr zukünftiges Mobilitätsverhalten zu befragen. Im Großen und Ganzen ist aber das Mobilitätsverhalten der ländlichen Bevölkerung in Deutschland bekannt.

Der bayerische Modal Split liegt 2017 bei 20 Prozent für ausschließlich zu Fuß zurückgelegte Wege, 11 Prozent für das Fahrrad, 45 Prozent für Wege der Pkw-Fahrer sowie 14 Prozent für die der Pkw-Mitfahrenden (Follmer, Robert et al., 2019). Der öffentliche Verkehr einschließlich des Fernverkehrs erreicht einen Anteil von 10 Prozent des Verkehrsaufkommens. Betrachtet man ausschließlich ländliche Räume, sinkt dieser Wert auf nur 6 Prozent (siehe Abbildung 4). ÖPNV-Nutzer sind vor allem Schüler und Studenten. Nicht-Berufstätige und Rentner nutzen sogar weniger den ÖPNV als Vollzeit-Beschäftigte, obwohl die Rentner grundsätzlich mehr Zeit hätten. Schüler ihrerseits sind mehr im Auto unterwegs als Studenten. Dies ist vor allem durch die Bring- und Holfahrten der Eltern zu erklären. Obwohl Voll- und Teilzeitbeschäftigte den größten MIV-Anteil haben, ist dieser bei Nicht-Berufstätigen und Rentnern nur unwesentlich kleiner. Vor allem Letztere sind generell flexibler mit ihrer Zeiteinteilung und Zeitbudgets. Auch gehen diese Gruppen mehr als alle anderen zu Fuß. Gerade bei den Schülerverkehren, den Nicht-Berufstätigen und Rentnern ist deshalb bei entsprechenden Maßnahmen ein bedeutendes Umstiegspotenzial zu erwarten.

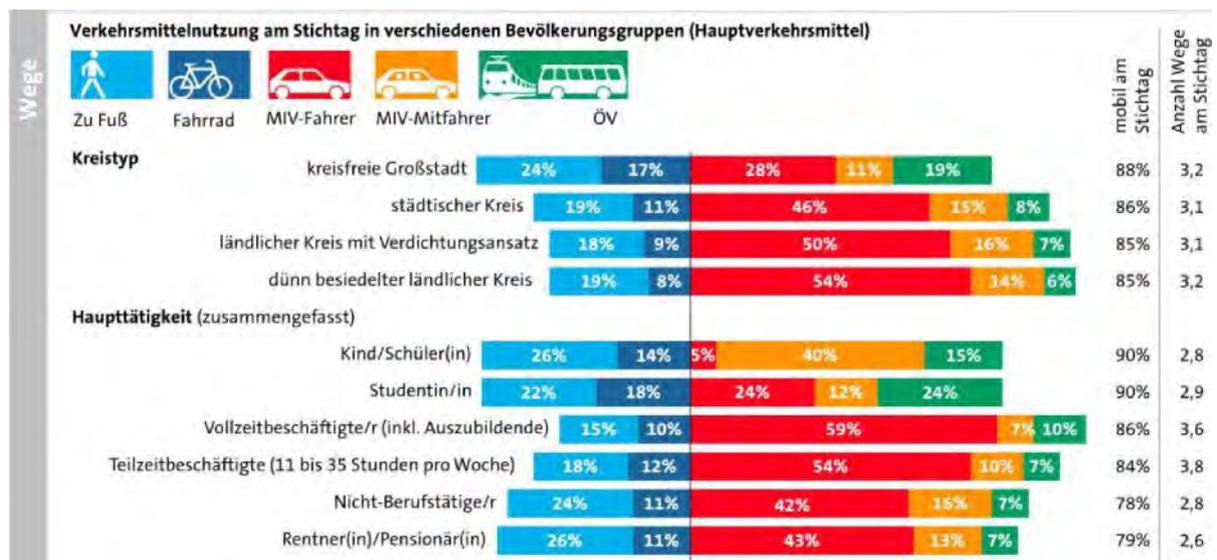


Abbildung 4: Verkehrsmittelnutzung in Bayern nach Kreistyp und Haupttätigkeit. Bild: Follmer, Robert et al., 2019

4.3.1 ILE-ÖPNV Studie

Der Verein Integrierte Ländliche Entwicklung (ILE) Fränkische Schweiz AKTIV e.V. hat im Sommer 2023 mit der Einführung des Deutschlandtickets eine « 30-Tages-Challenge » organisiert und diese mit einer täglichen App-basierten Umfrage begleitet. Die App hat die Firma Trafficon zur Verfügung gestellt. Wer als Autofahrer einen Monat auf den ÖPNV umsteigt und in einer der zwölf Kommunen der ILE Fränkische

Schweiz AKTIV wohnt, erhält vom ILE-Management testweise ein Deutschlandticket. Die Kommunen der ILE möchten damit Menschen motivieren, das ÖPNV-Angebot in der Region aktiv zu nutzen und Autofahrten durch Zug-, Bus- oder Fahrradfahrten zu ersetzen.

Die Aktion kam gut an und wurde von Schülerinnen und Schülern, Pendlerinnen und Pendlern sowie Seniorinnen und Senioren gleichermaßen genutzt. Am 21. Juni trafen sich die ersten 20 Studienteilnehmer, die sich bereit erklärt hatten, einen Monat auf ihr Auto zu verzichten, mit den Bürgermeisterinnen und Bürgermeistern am Bahnhof Kirchehrenbach, um sich über ihre Erfahrungen auszutauschen. Die Kritik war allerdings ernüchternd, wenn auch hinreichend bekannt: Gefahrenstellen für Radfahrer, fehlende Radwege oder schlechte Taktung bei Bus und Bahn wurden von den Teilnehmern beklagt. Parallel zur Deutschlandticket-Vergabe lief seit 1. Juni in der ILE Fränkische Schweiz AKTIV eine Umfrage unter Pendlern zur Nutzung des ÖPNV. Obwohl diese Umfrage nicht als repräsentativ anzusehen ist, zeigte sich, dass sich der ÖPNV-Anteil beinahe verdreifacht hat (siehe Abbildung 5). Allerdings wurde das Angebot im Allgemeinen als weniger zufrieden stellend empfunden (siehe Abbildung 6).

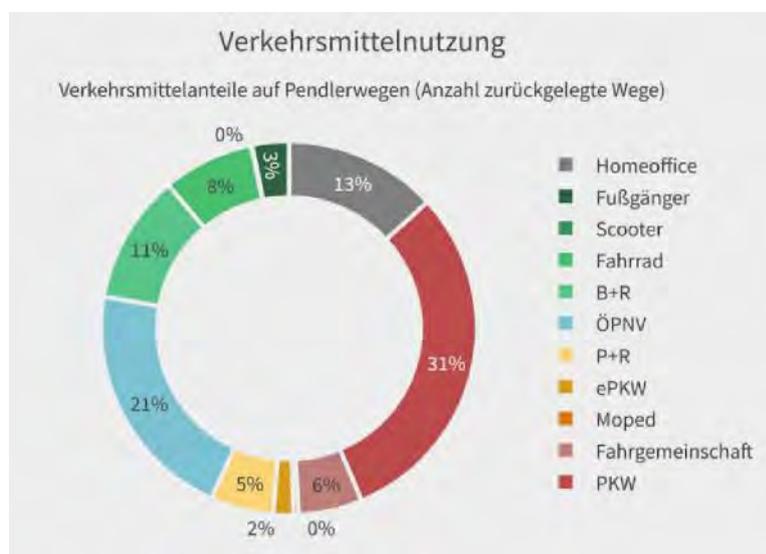


Abbildung 5: Umfrageergebnisse zum Modalsplit der ILE-Deutschlandticketaktion. Bild: ILE

4.3.2 Studentische Projektarbeit im Sommersemester 2023 an der Technischen Hochschule Nürnberg (der Ohm)

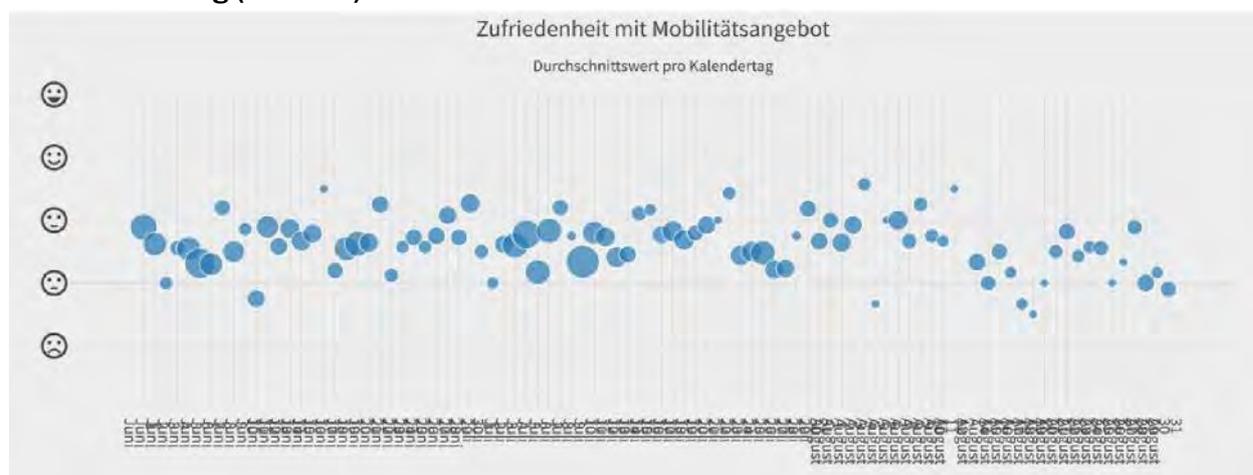


Abbildung 6: Umfrageergebnisse zur Zufriedenheit während Umfragezeit von Juni bis August der ILE Deutschlandticketaktion. Bild: ILE

Im Rahmen einer Projektarbeit an der Ohm wurde unter Betreuung von Prof. Bohlinger die „Intermodale Verknüpfung von Bahn und Rad insbesondere im ländlichen Raum“ untersucht (DÖRIG ET AL., 2023). Als

Untersuchungsraum diente die Fränkische Schweiz. Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde auch eine Umfrage auf der Bahnstrecke Forchheim – Ebermannstadt durchgeführt (siehe Abbildung 7). Zielgruppe dieser Umfrage waren Fahrgäste auf dieser Bahnstrecke, die überwiegend aus Schülern besteht. Als Probleme nannten die Befragten den Mangel an sicheren Fahrradabstellplätzen sowie Schwierigkeiten bei der Mitnahme von Fahrrädern in öffentlichen Verkehrsmitteln. Dementsprechend wurden mehr und sichere Fahrradabstellplätze an Haltestellen und an Bahnhöfen, als auch die Erweiterung der Kapazität für die Fahrradmitnahme im ÖPNV gewünscht. Allerdings wird dabei das Abschließen der Fahrräder an der Bahnstation bevorzugt. Bemängelt wurde auch die Unpünktlichkeit, die niedrige Frequenz der Züge und die Tarifstruktur der Bahn.



Abbildung 7: Fragen zu Umsteigemotivation und -hemmnissen beim Bahnfahren. Bild: Dörig et al, 2023

4.3.3 Umfrage im Rahmen der Vorlaufforschung „Rad und Bahn“

Im Rahmen der vorliegenden Vorlaufforschung wurde eine weitere Umfrage vorbereitet. **Um für die Verkehrswende Anreize zum Umsteigen zu schaffen, zielt diese Umfrage verstärkt auf Autofahrer ab.** Es ist vorgesehen, diese im Umfeld von Kirchehrenbach durchzuführen; dort spezifisch an den außerorts liegenden Supermärkten Norma und Edeka, die keine ÖPNV-Anbindung haben. Zusätzlich soll sie auch am Bahnhof durchgeführt werden.

Die Verkehrsbefragung ist an den Adventssamstagen mit hohem Kundenaufkommen geplant, sodass für diesen Zwischenbericht noch keine Ergebnisse vorliegen. In einer einmaligen Erhebung im Sinne einer Momentaufnahme soll das Potenzial an Autofahrern abgeschätzt werden, die in ihrer Freizeit bereit wären, eine Autofahrt durch Fahrrad und ÖPNV zu ersetzen, beziehungsweise festgestellt werden, weshalb sie dies nicht tun würden.

4.4 Neue E-Bike-Ladestationen in Kirchehrenbach

Im Rahmen dieser Vorlaufforschung wird auch die Annahme überprüft, dass E-Bike-Ladestationen insbesondere auch an Verknüpfungsstellen sowie an wichtigen Anlaufstellen die wechselseitige Benutzung von Rad und Bahn fördern können. Zu diesem Zweck werden drei E-Bike-Ladestationen im Ort Kirchehrenbach installiert. Die Ortschaft mit gut 2.200 Einwohnern liegt an der Bahnstrecke zwischen Forchheim (Oberfranken) und Ebermannstadt. Der Bahnhaltepunkt wird ab Dezember 2023 zwischen 6 und 23 Uhr im Stundentakt von dem EVU „agilis“ bedient, was zu einer vermehrten Nutzung der Bahn durch Pendler und Touristen führen soll. Dies stellt eine wesentliche Grundvoraussetzung dar, um zusätzlich Menschen zur Fahrt mit öffentlichen Verkehrsmitteln in Kombination mit Fahrrad und E-Bike zu motivieren. Als wichtige Ergänzung haben Einwohner und Touristen mit dem E-Bike dann die Möglichkeit zur Nutzung der beiden Ladepunkte im Ort sowie an der Bahnhaltestelle. Eine dazu begleitende Umfrage soll durchgeführt werden, um weitere Maßnahmen zur Förderung der E-Bike-Nutzung in der Region zu fördern und somit einen Beitrag zur angestrebten Verkehrswende zu leisten.

Die Frage nach dem Bedarf einer E-Bike-Ladestation stellt sich bei den heutigen Akkukapazitäten im Zusammenhang mit relativ langen Ladezeiten zu Recht, natürlich auch für Bewohner von Kirchehrenbach. Andererseits ist Kirchehrenbach auch ein von Radtouristen stark frequentiertes Gebiet, die von hier aus auf den Aussichtspunkt "Walberla" wandern oder mit dem Rad fahren möchten. Im Übrigen lassen sich die Stationen für angedachte Sharing-Dienste mit E-Bike, Lastenrad und E-Scooter nutzen. Nach Aussagen von Mitarbeitern der Gemeinde hat die Verwendung von E-Bikes seit der Pandemie deutlich vornehmlich zur Freizeitnutzung zugenommen.

In Absprache mit der Gemeinde wurden die drei untenstehenden Standpunkte ausgewählt, die lagebedingt für den hier vorgestellten Untersuchungszweck gut geeignet sind. Zudem befinden sie sich auf dem Boden der Gemeinde und lassen sich mit geringem Aufwand an das öffentliche Stromnetz anschließen. Die Ladestationen befinden sich an folgenden Standpunkten (siehe Abbildung 8), können aber bei Bedarf problemlos umplatziert werden, sofern ein Stromanschluss mit 230 V vorhanden ist.

- Bahnhaltestelle Kirchehrenbach; unter den überdachten Fahrradständern, Bahnhofstrasse 23
- Schulhaus, beim Eingang an der Hauptstraße 53
- Gemeindehaus, Eingang an der Straße zur Ehrenbürg 7

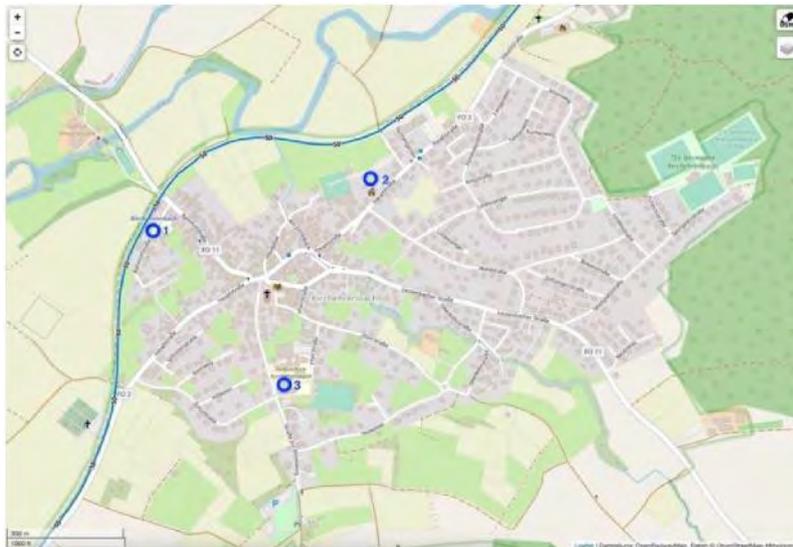


Abbildung 8: Neu errichtete E-Bike-Ladestationen ab 2024 in Kirchehrenbach; 1 Bahnhof, 2 Gemeindehaus, 3 Schulhaus.
Bild: Screenshot OpenRailMap

Der Bahnhof Kirchehrenbach wurde 1994 zum Haltepunkt herabgestuft. Immerhin besitzt er eine überdachte Fahrradabstellanlage, wie im Hintergrund auf Abbildung 11 zu erkennen ist. Dies ist ein Ansatz zur besseren Verknüpfung von Rad und Bahnverkehr, der durch eine E-Bike-Ladestation aufgewertet wird. Die Nutzung der Bahn und dieser Haltestelle ist als bescheiden zu bezeichnen, da die einzige Begründung zum Weiterbetrieb der Strecke „offiziell“ im Schülerverkehr Richtung Ebermannstadt zum dortigen Gymnasium liegt. Ende 2023 soll zumindest von 5-23 Uhr stündlich ein Zug verkehren. Für einen 30-Minuten-Takt wäre der Wiedereinbau der vor Jahrzehnten abgebauten Ausweichstelle notwendig.



Abbildung 9: Bahnhaltepunkt Kirchehrenbach mit überdachter Fahrradabstellanlage. An dieser Stelle wird auch eine E-Bike-Ladestation im Rahmen dieser Vorlauforschung aufgestellt. Bild: Robert Künzler

An den neu errichteten Ladesäulen mit zwei integrierten Ladekabeln für zwei E-Bikes kann über je drei verschiedene Ladestecker jederzeit schnell und kostenlos Strom geladen werden. In einer großformatigen, abstrahierten Darstellung mit charakteristischen Merkmalen der Umgebung von Kirchehrenbach werden die Ladesäulen im öffentlichen Raum deutlich erkennbar gemacht und durch farblich prägnante Streifen Dynamik und Geschwindigkeit ausgedrückt (siehe Abbildung 10). Der weiße, überlagerte Schriftzug und das halbtransparente, stilisierte Fahrradsymbol sollen die Ladefunktion verdeutlichen und so für Bewohner, Pendler und Touristen eine unkomplizierte Nutzung der E-Bikes bewerben. Durch die eigens entwickelte Grafik, die sich von üblichen Infrastrukturgrafiken deutlich und wohltuend abhebt, wird ein Wiedererkennungswert geschaffen, die Wertigkeit der Maßnahme unterstrichen und entsprechend kommuniziert werden.



Abbildung 10: Die ausdrucksstarke Grafik für die Ladestationen in Kirchehrenbach wurde teilweise mithilfe von KI-Bildgeneratoren in Dutzenden Iterationsschritten erstellt und anschließend manuell verfeinert.

Bild: Robert Künzler. E-Bike-Logo und Fahrradsymbol by „ONgeiner“

Die von der Firma ONgineer entwickelte und in Deutschland gefertigte Ladestation vom Typ "LiON Box Max 36-V-E-Bike-Ladestationen" (Abbildung 11) weist folgende Spezifikationen auf:

- Flexibel konfigurierbare E-Bike-Ladebox für das parallele Laden von zwei unabhängigen 36-V-Systemen, intern elektrisch gegeneinander abgesichert
- Ohne Registrierung nutzbar. Einstecken und Laden
- Wandgehäuse aus witterungsbeständigem Kunststoff mit H x B x T= 435 x 315 x 190 mm (IP54)
- Patentiertes Steckersystem für bis zu vier verschiedene Akku-Typen an einer Box (BOSCH, Rosenberger für BMZ, Brose, Specialized und Shimano)
- Ladestrom vier Ampere
- Zwei Kabelhalter, zwei Ladepunkte und maximal sechs wählbare Stecker pro Box und eine Schuko-Steckdose mit 230 V als zusätzlicher Ladepunkt für persönlich mitgebrachte Ladegeräte
- Umfassende Schutzschaltungen für einen sicheren Betrieb
- Automatischer Vorladebetrieb bei entladenen Batterien („Precharge“)
- Schutz der Akkus durch die Begrenzung der Maximalladung
- Austausch von Stecker und Ladekabel ohne Gehäuseöffnung möglich



Abbildung 11: LiON Box Max – 36 V E-Bike-Ladestationen. Bild: Robert Künzler und ONgineer

4.5 Entwicklung eines modularen MobilityHub-Systems

In diesem Projekt werden Ziele und Herausforderungen für die Entwicklung und Umsetzung von MobilityHubs zur Verbesserung der Fahrradbindung an die Bahn erörtert. Dabei werden sowohl die funktionalen, technischen als auch die sozialen Aspekte berücksichtigt, die für den Erfolg von MobilityHubs entscheidend sind.

4.5.1 MobilityHubs im ländlichen Raum

Um eine bessere Fahrradbindung an die Bahn in ländlichen Gebieten zu erreichen, sind verschiedene Maßnahmen erforderlich, die sowohl die Infrastruktur als auch die Organisation des gesamten Verkehrssystems betreffen. Ein vielversprechender Ansatz ist die Schaffung von sogenannten MobilityHubs, die als Schnittstellen zwischen dem Rad-, Schienen- und Busverkehr dienen und verschiedene Dienstleistungen und Angebote für Radfahrer und „Mikromobilisten“ bereitstellen können. Intermodale MobilityHubs können die Attraktivität und Effizienz der Rad-Bahn-Kombination deutlich erhöhen und längerfristig zu einer Verlagerung des Modalsplits zwischen ÖV und den MIV beitragen.

4.5.2 Modulares, flexibel aufbaubares MobilityHub-Baukasten-System

Ausstattungsmerkmale eines Intermodalen MobilityHubs

Das MobilityHub-System basiert grundsätzlich auf einem modularen, industriell vorgefertigten Baukastensystem, das weitgehend an örtliche Anforderungen, Bedürfnissen der Fahrgäste und weitere Begebenheiten angepasst werden kann. Das Diagramm in Abbildung 12 zeigt die grundlegenden Funktionen.

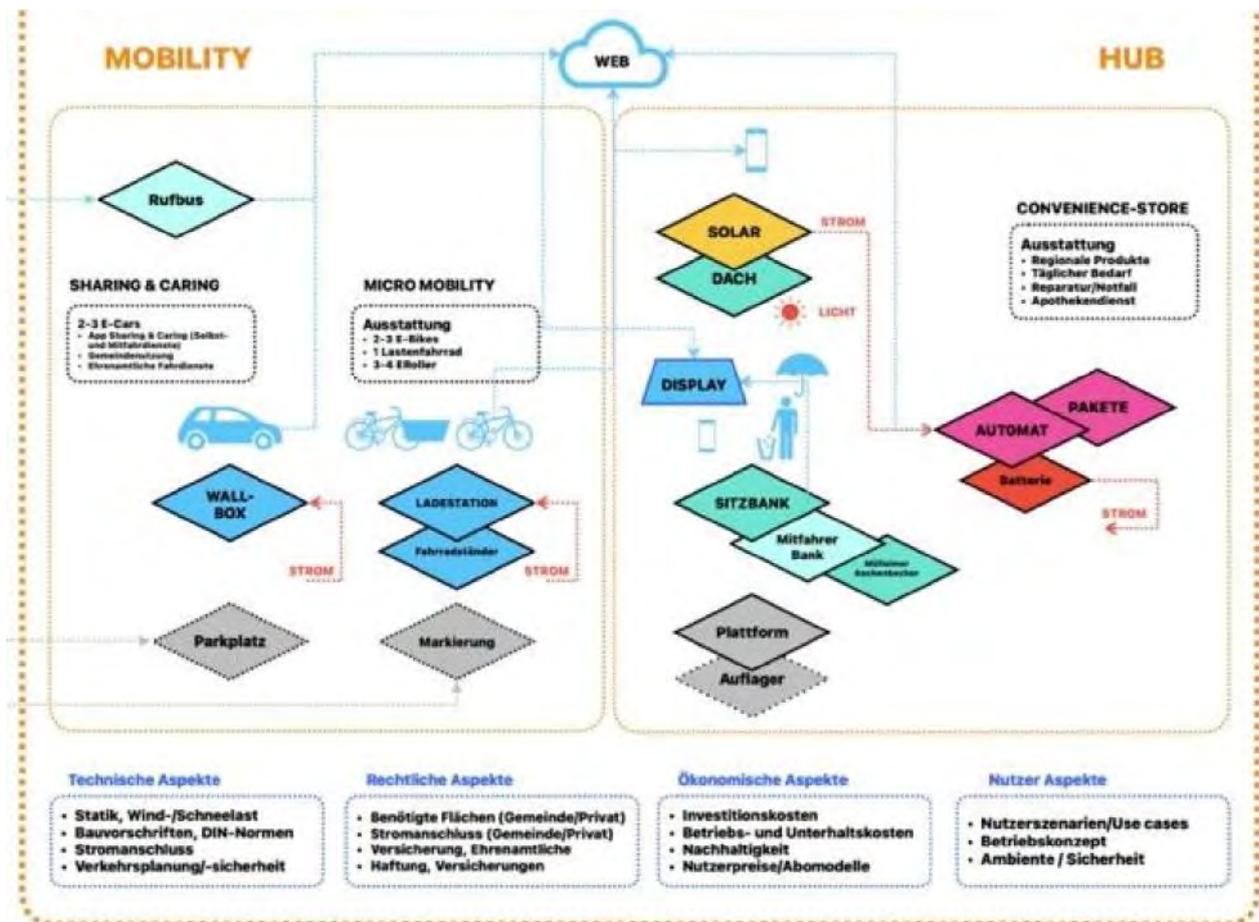


Abbildung 12: Funktionsdiagramm eines MobilityHubs. Bild: Andreas Vogler Studio

MINI-, MIDI- und MAXI-Module zur freien Konfiguration eines MobilityHubs

Drei Hauptkategorien – genannt MINI, MIDI und MAXI – bieten untenstehende Ausstattungsmerkmale, die alle frei untereinander kombinierbar sind und mittels eines mobilen Kleinkrans innerhalb eines Arbeitstages vor Ort aufgestellt werden können (siehe Abbildung 13). Durch die Modulbauweise ergibt sich gestalterisch ein einheitliches und wiedererkennbares Erscheinungsbild für die MobilityHubs, die durch regional individualisierte Elemente ergänzt werden können.

MINI: Grundausrüstung

- Hell beleuchtete, kameraüberwachte und witterungsgeschützte Fahrrad-Parkplätze
- Stabile und mit Diebstahlschutz ausgerüstete Radständer
- Ladestationen für E-Bikes und E-Scooter
- Echtzeitinformationen, Fahrpläne auf Monitor und Smartphone
- Hinweise zu weiteren Parkplätzen und Routen
- Überdachte und windgeschützte Wartezone mit Sitzgelegenheit
- Mülleimer und Aschenbecher
- Sicherheit durch Videoüberwachung
- Stabile und leistungsfähige mindestens 4G-Mobilfunkverbindung (WLAN siehe MAXI)
- Regelmäßige Reinigung und Unterhalt durch Vertragspartner
- Fahrradreparaturstation mit Luftpumpe

MIDI: erweiterte Ausstattung

- Sitzgelegenheit mit Tischen
- Getränke- und Lebensmittelautomat
- Paketstation
- Toiletten mit Vertragspartner zur regelmäßigen Reinigung
- Lastenrad-Parkplatz mit E-Ladestation als Sharing-Konzept

MAXI: optionale Elemente, je nach Bedarf- und Nutzeraufkommen

- Wartezone beheizt
- Optionaler ÖPNV-Ticket-Automat, wenn nicht im Fahrzeug vorhanden
- Fahrradverleih und Reparaturdienst
- Schließfächer gegen Entgelt (maximal 24 Stunden)
- Kiosk, Cafés mit Bedienung (auch mobil zu Hauptverkehrszeiten)
- Carsharing und E-Scooter-Verleih
- E-Auto-Ladestation
- Bei mangelhafter Mobilfunkabdeckung: WLAN-Hotspot via Satelliten-Internet (Starlink)

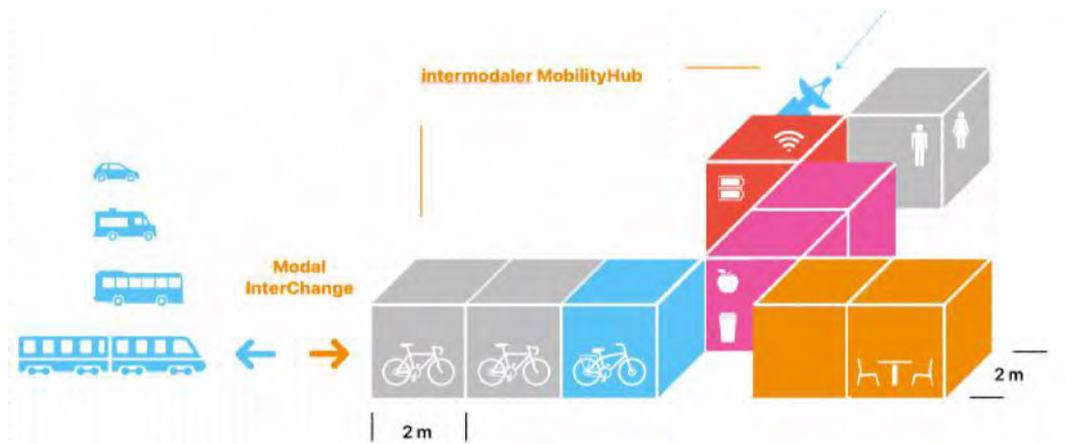


Abbildung 13: Konfiguration bestehend aus MINI-, MIDI- und MAXI-Systemmodulen. Darstellung ist beispielhaft und kann je nach Ort variieren sowie an die tatsächlichen Anforderungen angepasst werden. Bild: Robert Künzler, Andreas Vogler Studio

Design, Aufbau und Verwendung von MobilityHubs

Eine genauere Analyse der Raumstruktur entlang der Wiesenttal-Bahnlinie RB22 ergibt eine ländlich geprägte Dorfstruktur mit jeweils zwei bis drei Kilometer Abstand zwischen den einzelnen Ortschaften. Diese relativ kleinen Siedlungen mit 1.000 – 2.500 Einwohnern sind in Bezug auf ihre Anbindung an den S/ÖPNV oft wenig attraktiv für Bewohner wie auch für Touristen. Busverkehr im Zweistundentakt mit zeitweiligem Stundentakt am Morgen und Nachmittag stellen die Regel dar (Beispiel Leutenbach im Landkreis Forchheim). Ein Großteil der Nahversorger liegen entlang der RB22 in einer Distanz von zwei bis sechs Kilometern, was für ein E-Bike oder E-Scooter etwa fünf bis 20 Minuten Fahrzeit bedeutet und infolgedessen eine Alternative zum MIV sein kann.

Als Ausgangspunkt für eine erweiterte Studie würden sich die Gemeinden Kirchehrenbach und Wiesenthau mit Ihren Bahnanschlüssen und die kleinen Dörfer rund um das historische Wahrzeichen der Fränkischen Schweiz und beliebte Naherholungsgebiet ‚Walberla‘ eignen (siehe Abbildung 14).

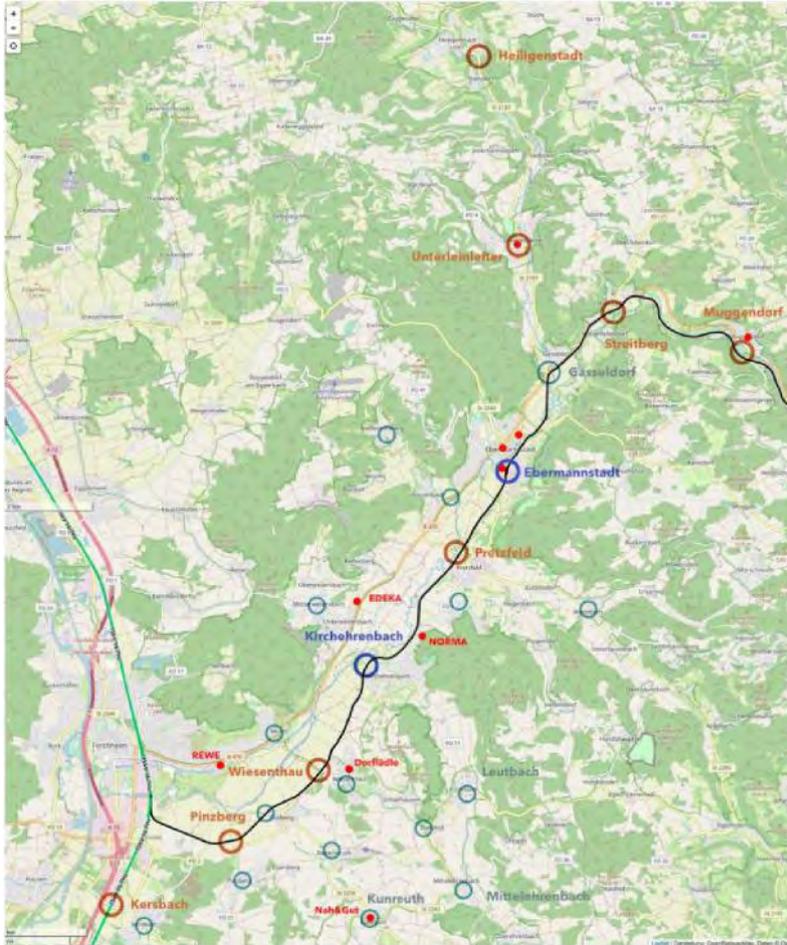


Abbildung 14: Karte der Fränkischen Schweiz mit möglichen Standorten für MINI (türkis), MIDI (orange) und MAXI (blau) MobilityHubs. Andreas Vogler Studio.
Bild: Screenshot OpenRailwayMap

Beim MobilityHub soll eine modulare Systemstruktur zur Anwendung kommen, sodass mit leicht anpassbaren Systemelementen unterschiedliche Konfigurationen schnell und kostengünstig umsetzbar sind. Rahmenprofile können mit wenigen Handgriffen zusammengestellt und nach Kundenwünschen für verschiedenste Zwecke (siehe dazu Kapitel: Mini, Midi, Maxi) industriell vorgefertigt und aufgebaut werden.

Das System lässt sich beliebig nach der gegebenen Fläche skalieren, also erweitern oder auch wieder zurückbauen. Kostspielige Fehlplanungen lassen sich so leichter vermeiden und gleichzeitig hemmt es die Schwelle, dass überhaupt MobilityHubs implementiert werden. Darüber hinaus bieten sich die kompakten Module auch für temporäre Installationen und Veranstaltungen an, wie zum Beispiel für größere Festivals, temporäre Haltestellen, Schulen, Gemeindehäuser und viele mehr. Sie erfüllen ihren Zweck als flexible Bauten, die keine langwierigen Baugenehmigungsverfahren erfordern und somit eine schnelle und flexible Antwort auf zu lösende Probleme an der Schnittstelle zwischen Rad und Bahn darstellen (siehe Abbildungen 15, 16, 17).

Die Fertigung und Montage der einzelnen Module mit einer Grundfläche von 2 x 2 m und einer Bauhöhe von 2,3 m wird vormontiert an den vorgesehenen Standort per Lastwagen angeliefert und an der gewünschten Position platziert. Um die Bodenplatten der Module vor Ort anzupassen und waagrecht auszurichten, sind höhenverstellbare Schraubelemente an den Modulen vorhanden. Die Bodenplatten werden mit Betonsteinen beschwert, um den Windlasten standzuhalten. Fundamente sind somit keine erforderlich, was einen raschen Aufbau und bei Bedarf eine leichte Umplatzierung der Module ermöglicht. Auch sind dadurch keine Baugenehmigungen notwendig, die besonders in einer Versuchsphase hinderlich sind. Für Module, die eine elektrische Stromversorgung benötigen, ist ein 230-V-Stromanschluss vorzusehen. Alternativ lässt sich auch je nach Budget eine Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher einsetzen, um die Energieversorgung netzunabhängig sicherzustellen.

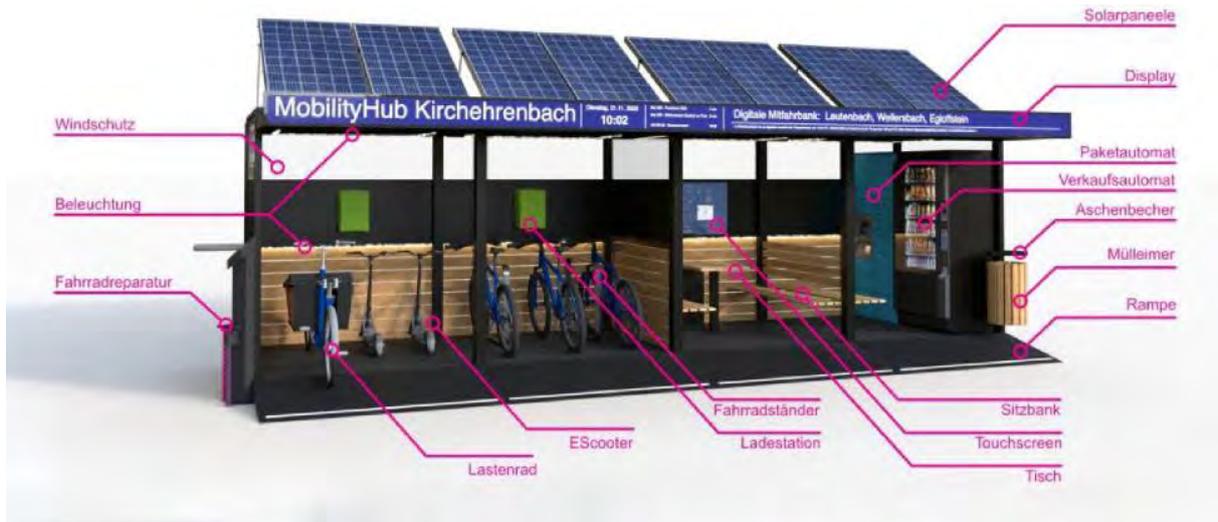


Abbildung 15: MobilityHub aus vier Grundmodulen mit Fahrradladestation, Sitzbänken und Verkaufs- und Paketautomaten. Bild: Andreas Vogler Studio



Abbildung 16: MobilityHub mit elektronischem Display. Bild: Andreas Vogler Studio



Abbildung 17: MobilityHub mit elektronischem Display in der Nacht. Bild: Andreas Vogler Studio

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die geleisteten Untersuchungen und Ergebnisse im Rahmen der Vorlaufforschung bilden die Grundlage zu weiteren Antragstellungen. Diese zielen auf die Durchführung von Reallaboren ab, die in der Modellregion Fränkische Schweiz den Beitrag von Mikromobilität zur Erhöhung der Fahrgastzahlen im ÖPNV und insbesondere SPNV leisten können. Hier soll agil mit mobilen und modularen MobilityHubs sowohl auf örtliche wie verkehrstechnische Situationen reagiert werden können. Besonders für Fahrradfahrer und „Mikromobilisten“ soll die notwendige Infrastruktur im ländlichen Raum an den Schnittstellen zum öffentlichen Verkehr und deren Belange wie Sicherheit und Komfort ausgebaut werden, um eine attraktive Alternative zum MIV für die angestrebte Verkehrswende zu schaffen.

Durch die Vorlaufforschung wurde eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Architekten, Industriedesignern und Verkehrsingenieuren etabliert. Außerdem ist die bereits bestehende Zusammenarbeit mit kommunalen Vereinigungen wie der „ILE Fränkische Schweiz aktiv E.V.“ weiter vertieft worden, die regelmäßig Tagungen zum Thema Verkehrswende und Mobilität in der Fränkischen Schweiz organisiert und der bereits die Inhalte dieser Vorlaufforschung präsentiert wurden.

Im Verlauf der Vorlaufforschung sind Ergebnisse und Überlegungen in eine Projektskizze für die Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur „Transformationsinitiative Stadt-Land-Zukunft“ eingeflossen. Dort wurden auch flexibel einsetzbare MobilityHubs im Rahmen eines Reallabors vorgeschlagen. In diesem sollen die entwickelten Leitbilder und Grundannahmen durch Versuchsanordnungen vor Ort verifiziert und zügig auf die neuesten Erkenntnisse während des Entwicklungsprozesses angepasst werden.

6 Literatur

Bundesministerium & für Ernährung und Landwirtschaft. (2023). Bekanntmachung Nr. 03/2023/42 über die Durchführung von Modell- und Demonstrationsvorhaben „LandStation – Verknüpfte Mobilität in ländlichen Räumen“ im Rahmen des Bundesprogramms Ländliche Entwicklung und Regionale Wertschöpfung (BULEplus).

https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BULE/Bekanntmachung_LandStation.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Claudia, N., & Kuhnimhof, Tobias. (2018). Mobilität in Deutschland 2017.

<https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/publikationen2017.html>

Dörig, L., Gleißner, S., Mößler, M., Stündl, F., Beimann, J., Brehm, A., & Karaaslan, E. (2023). Studienarbeit im SS 2023 Intermodale Verknüpfung von Bahn und Rad insbesondere im ländlichen Raum -IVS-Erreichbarkeitsranking. (2023). Allianz pro Schiene.

<https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/dossiers/erreichbarkeitsranking/>

Follmer, Robert, Gruschwitz, Dana., & Kestermann, Christian. (2019). Mobilität in Deutschland – MiD Kurzreport Bayern.

https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/med/aktuell/infas_kurzreport_mid2017_bayern.pdf

Kreisangehörige Gemeinde. (o. J.). KommunalWiki. Abgerufen 16. November 2023, von https://kommunalwiki.boell.de/index.php/Kreisangeh%C3%B6rige_Gemeinde

Naumann, Thomas. (2022). Stadtverkehr – Regio-S-Bahnen: Beitrag zur Verkehrswende abseits der großen Verdichtungsräume? stadtverkehr, 9/2022, 24–33.

Neue Mobilität und Mobilitäts-Hubs im ländlichen Raum. (2023).

Vogler, A., & Künzler, R. (2021). bahnautonome bayern 2029 – Vorstudie zur Digitalisierung von Nebenbahnen.

How to prevent Caking? – Trockene, partikelbasierte Prozesse effizient gestalten

Prof. Dr.-Ing. Sandra Breitung-Faes

Fakultät Verfahrenstechnik/Mechanische Verfahrenstechnik

Sofia Dibrova, M. Eng.

Fakultät Verfahrenstechnik

Zusammenfassung:

Caking ist ein häufig auftretendes Phänomen im Bereich des Transports und der Handhabung von feinen Pulvern. Charakteristisch für diesen Prozess ist das Entstehen von Agglomeraten und großen Klumpen, die an der Wandoberfläche haften und die Produktionsprozesse in Bezug auf Effizienz und Produktqualität negativ beeinträchtigen. Eine der kennzeichnenden Ursachen dafür sind die Wechselwirkungen zwischen Partikeln sowie zwischen Partikeln und Wand. Im Rahmen dieses Projekts wurden einerseits die Einflüsse von drei verschiedenen Additiven auf zwei Modellstoffe im Hinblick auf das Transport- und Trennverhalten untersucht. Andererseits wurden die ersten Schritte zur Entwicklung eines geeigneten Versuchsstandes unternommen, um die industrienahen Bedingungen des Partikel-Wand-Kontakts zu bewerten.

1 Projektdaten

Fördersumme	34.665,50 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Verfahrenstechnik/Mechanische Verfahrenstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Sandra Breitung-Faes
Projektteam	Sofia Dibrova, M. Eng., Projektbearbeitung Leon Appoldt, Bachelorarbeit Ufuk Yildiz, HiWi
Kontaktinformationen Projektleitung	sandra.breitung-faes@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Pulverförmige Produkte werden in vielen verschiedenen Industriezweigen verarbeitet. Einige große Branchen wie zum Beispiel die Pharmazie, Lebensmittelherstellung, Chemie und Bauindustrie produzieren und verwenden Schüttgüter. Auch in der Produktion von Farben, Lacken sowie in der Wasch- und Reinigungsmittelindustrie gewinnen feine Pulver zunehmend an Bedeutung [1]. Dies ist einerseits auf die Verbesserung sensorischer Eigenschaften, zum Beispiel Farbe, Geschmack, Textur und Konsistenz, sowie auf die Steigerung funktionaler Eigenschaften, zum Beispiel Bioverfügbarkeit und Endfestigkeit beim Beton zurückzuführen. Die genauen Produktionsmengen sehr feiner Pulver sind zwar schwer zu schätzen, jedoch ist die Produktion pulverförmiger Produkte in den letzten Jahren exponentiell gestiegen. Im Jahr 2020 wurde beispielsweise geschätzt, dass in Europa bis zu 700 Kilotonnen (kt) Lactose produziert wurden [2]. Allein im Jahr 2022 wurden in Deutschland etwa 500 kt Weizenstärke hergestellt [3]. Neben organischen Pulvern werden auch anorganische Pulver in vielen Bereichen verarbeitet. Der Talkmarkt beträgt zum Beispiel im Jahr 2023 etwa 7326 kt [4], und der Kalksteinmarkt liegt bei etwa 790 kt [5].

Die Herstellung und Verarbeitung feiner Pulver kann eine Vielzahl von Verfahrensschritten erfordern, einschließlich Zerkleinerung, Fluidisierung, pneumatischer Förderung, Granulierung, Mischung, Trocknung und anderer Schritte [6]. In diesen Prozessen besteht das Risiko von Caking. Caking ist die unerwünschte Agglomeration von Partikeln, bei der größere und unerwünschte Klumpen entstehen und an den Oberflächen haften bleiben können [7]. Sind die Ablagerungen organischen Ursprungs, können sie Alterungs- und Faulungsprozessen unterliegen. Im Allgemeinen können sich die Auswirkungen von Caking nachteilig auf die Produktqualität und die Prozesseffizienz auswirken, da sie zu verlängerten Wartezeiten und steigenden Kosten führen [8].

Die Gründe für dieses Materialverhalten resultieren aus den Haftkräften zwischen den Partikeln untereinander sowie zwischen den Partikeln und den Wandoberflächen. Zu den Mechanismen, die zu Caking führen können, gehört oft die Bildung von Festkörper- und Flüssigkeitsbrücken, beispielsweise durch Adsorption oder Kristallisation. Diese Brückenbildung kann durch Einflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur, Lagerzeit und die auf das Schüttgut während der Lagerung wirkende Spannung verursacht werden [8]. Diese Mechanismen wurden in zahlreichen Forschungsarbeiten untersucht und werden in der einschlägigen Literatur ausführlich beschrieben (vgl. [1], [9] – [11]).

Zusätzlich zur Bildung von Festkörper- und Flüssigkeitsbrücken sind auch die Van-der-Waals-Kräfte für Caking verantwortlich. Diese Kräfte resultieren aus den Dipol-Wechselwirkungen zwischen benachbarten Oberflächen. Obwohl diese Kräfte eine begrenzte Reichweite haben, sind sie bei engem Kontakt und

sehr feinen Partikeln von großer Bedeutung. Dies liegt daran, dass die Oberfläche im Verhältnis zum geringen Partikelgewicht erheblich ist. [12] Aufgrund vieler möglicher Kontaktpunkte wird das frei fließende Pulver kohäsiv und haftet stark zusammen. Des Weiteren können Eigenschaften wie zum Beispiel die Partikelgrößenverteilungsbreite, Form, Oberflächenenergie sowie Oberflächenladungen und Oberflächenrauheit sowohl der Partikel als auch der Wandoberflächen die Kohäsion und Adhäsion beeinflussen [13]. Zudem spielen Prozessparameter wie zum Beispiel die Auftreffmechanismen und die Geometrie der Wände eine Rolle.

Durch den Zusatz von Additiven kann das Fließverhalten feiner Pulver beeinflusst werden. Durch das Beifügen von festen nanopartikulären Additiven, die sich an der Oberfläche der Partikel ablagern und somit die Oberflächenrauheit verändern, wird der interpartikuläre Abstand zwischen den Hostpartikeln vergrößert, wodurch die Van-der-Waals-Kräfte abnehmen. Dabei ist die Konzentration des Additivs von großer Bedeutung: Ist die Abdeckung zu niedrig, sind die Haftkräfte zwischen den Partikeln immer noch zu hoch, während eine zu hohe Abdeckung zu einer Ebnung der Oberfläche führen kann. [12]

Bei der Zugabe von flüssigen Additiven adsorbieren die Moleküle an der Partikeloberfläche, wodurch sterische Barrieren zwischen zwei bedeckten Partikeln entstehen. Oberflächenbereiche mit hoher Oberflächenenergie auf den Partikeln werden abgeschirmt, und somit werden die Van-der-Waals-Kräfte geschwächt. Typische Additive sind Alkohole, Glykole, Amine und Carbonsäuren in niedrigen Konzentrationen, während ein hoher Konzentrationsbereich sich auf die Bildung von Flüssigkeitsbrücken auswirken kann. Der genaue Wirkmechanismus zwischen den Partikeln und den flüssigen Additivmolekülen ist jedoch noch nicht vollständig verstanden. [14]

Die Vielzahl der Parameter, die einen Einfluss auf das Caking haben könnten, erfordert eine Betrachtung dieses Verhaltens auf verschiedenen Ebenen. Einerseits ist es wichtig, den Zusammenhang zwischen den Eigenschaften einzelner Partikel und dem Verhalten des Pulvers in Bezug auf die Kohäsion zu verstehen. Daraufhin soll die Untersuchung der Interaktionen des Pulvers mit den Apparate- und Maschinenwänden in Bezug auf die Adhäsion erfolgen. Erst wenn diese beiden Effekte deutlich ausgeprägt sind, kommt es zur Anhaftung von Partikeln und zur Bildung dickerer Schichten, was charakteristisch für das Caking ist.

Die bereits entwickelten Methoden zur Untersuchung des Caking-Verhaltens von Pulvern, beispielsweise der Einsatz von Scherzellen [15], einachsiger Kompression [16], Zugversuchen [17], Penetrationstests [18] oder anderen alternativen Methoden [19] – [21] dienen dazu, den Einfluss von Druck, Temperatur und Feuchtigkeit auf das Pulver zu ermitteln. Sie geben jedoch keine Auskunft darüber, wie sich nicht vorverfestigte Proben unter „normalen“ Bedingungen verhalten und beschreiben oft nicht den Einfluss der „realen“ Wandoberflächen oder Prozessparameter. Andererseits gibt es Arbeiten von Eilbeck (siehe [22], [23]), die die elektrostatische Aufladung von Lactose direkt in einem Zyklon mit verschiedenen Materialien für die Innenwände untersucht haben. In den Arbeiten von Wang [13] wurde eine Testroutine entwickelt, um den Einfluss der Metallrauigkeit auf die Partikeladhäsion zu untersuchen. Im Hinblick auf das Caking-Verhalten von luftgetragenen, nicht vorverfestigten Partikeln bietet jedoch keine Methode eine zufriedenstellende Möglichkeit, eine schnelle und zuverlässige Vorhersage des Pulverprozessverhaltens zu treffen.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war, die ersten Untersuchungen zur Entwicklung einer einfachen Testroutine zur Prüfung des Agglomerations- und Anhaftungsverhaltens von luftgetragenen Partikeln durchzuführen. Dafür wurden zwei Arbeitspakete formuliert:

- Untersuchung von Additiven bei einfachen Transport- und Trennvorgängen;
- Entwicklung eines Versuchsstandes, mit dem das Anhaftungsverhalten von trockenen Pulvern an Wänden im kleinen Maßstab gemessen werden kann.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 sollten Transport- und Trennvorgänge mit einfachen Bewegungsmustern untersucht werden. Zur Erstellung einer Referenz sollten die ersten Messungen ohne Zugabe von Additiven mit Modellstoffen wie Lactose und Kalkstein durchgeführt werden. Nach Festlegung der Versuchsbedingungen sollten die Additive den Referenzpulvern beigemischt werden. Additive sind Zusatzstoffe, die, wie in [24] gezeigt wurde, das Agglomerieren deutlich reduzieren können. Das Ziel der Additivierung von Pulvern war somit, möglichst keine Agglomerate bei möglichst hoher Fließfähigkeit zu erreichen, um einen Kontrast zur Verarbeitung ohne Additive darzustellen.

Im Kontext des Arbeitspaketes 2 sollten verschiedene Prozesse in der mechanischen Verfahrenstechnik betrachtet werden, um die häufig auftretenden Gegebenheiten des Partikel-Wand-Kontakts zu evaluieren und mit diesen Informationen eine Konstruktion zur Umsetzung eines Versuchsstandes zu entwickeln. Dabei sollten die möglichen Auftreffmechanismen von Partikeln an Wänden und verschiedene Geometriefaktoren berücksichtigt werden.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Abschnitt 4.1 des Kapitels 4 sind die Ergebnisse des ersten Arbeitspakets vorgestellt. Es ist wichtig zu bemerken, dass die Untersuchung des Einflusses von Additiven in verschiedenen Konzentrationen erfolgte, wie in Tabelle 1 dargestellt. Dieser Bericht konzentriert sich jedoch ausschließlich auf die optimalen Konzentrationen innerhalb jeder Versuchsreihe für die beiden Modellstoffe.

Im Abschnitt 4.2 wird auf das Arbeitspaket 2 eingegangen.

4.1 Untersuchung der Additive bei Transport- und Trennvorgängen

4.1.1 Materialien und Methoden

Als Beispiele für feine Pulver wurden das organische alpha-Lactose-Monohydrat SorboLac® 400 ($x_{50,3} = 39 \mu\text{m}$) von der Meggle GmbH sowie das anorganische Calciumcarbonat in Form von Kalkstein ($x_{50,3} = 7 \mu\text{m}$) vom Hersteller Stricker und Weiken GmbH verwendet. Zur Additivierung wurden drei Additive unterschiedlicher Substanzklassen eingesetzt (siehe Tab. 1).

Substanzklasse	Additiv	Hersteller	Konzentration
Carbonsäuren	Heptansäure (HepAc)	Thermo Fisher Scientific	0,1 – 0,4 Gew.-%
Amine	Triethanolamin (TTE)	Carl Roth GmbH	0,1 – 0,4 Gew.-%
Schmiermittel	Natriumstearylfumarat (SSF)	Tokyo Chemical Industry	0,5, 1,0 & 2,0 Gew.-%

Tabelle 1: Liste der verwendeten Additive

Die Zugabe der Additive erfolgte mithilfe eines Überkopfschüttlers vom Typ 3040 des Herstellers GFL GmbH. Das Trennverhalten wurde sowohl in einem Zick-Zack-Windsichter MZM 1/40 von HOSOKAWA ALPINE AG als auch mit einer Vibrationssiebmaschine von Retsch GmbH begutachtet. Das Transportverhalten wurde in den Vibrationsrinnen – ebenfalls von Retsch GmbH – untersucht. Darüber hinaus wurde die Fließfähigkeit aller Pulvermischungen mit dem Volution Powder Flow Tester Modell Vol2013 von PS Prozesstechnik GmbH bestimmt. Die Bestimmung der Agglomeratgröße erfolgte mit der Systemkonfiguration QICPIC-GRADIS/L-VIBRI/L von Sympatec GmbH sowie mit dem CAMSIZER® des Herstellers Retsch GmbH. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe wurde mit der Konfiguration QICPIC-RODOS/L-VIBRI/L bei einer DruckluftEinstellung von etwa 5 bar durchgeführt.

4.1.2 Trennverhalten Siebmaschine

Ein Siebturm besteht aus mehreren Siebböden, die übereinander mit aufsteigender Maschengröße angeordnet sind. Durch Vibration wird das auf dem obersten Sieb befindliche Aufgabegut in Bewegung versetzt, wodurch es beim Fallen nach unten wandert und sich entsprechend der Maschengrößen in verschiedene Korngrößenfraktionen aufteilt. Auf diese Weise kann eine Aussage über die Partikelgrößenverteilung eines Produktes getroffen werden. Im Rahmen dieses Versuches wurde das Augenmerk auf das Desagglomerations- und Transportverhalten von Pulvern aufgrund der Wurfbewegungen mit und ohne Zusatzstoff gelegt. Zum Vergleich ist die Partikelgrößenverteilung der beiden Modelle unter Verwendung der Druckluftdispersion dargestellt.

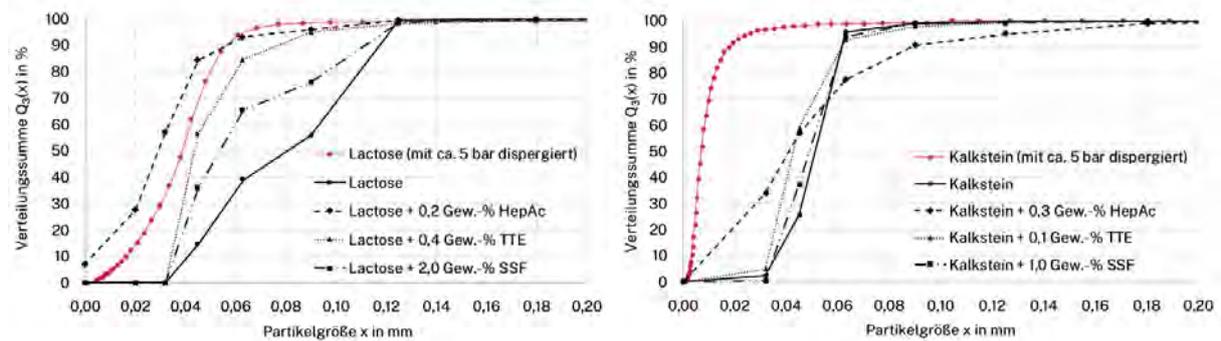


Abbildung 1: Summenverteilung der Siebanalyse für Lactose- und Kalksteinmischungen. Die rot markierten Verläufe wurden mit der Systemkonfiguration QICPIC-RODOS/L-VIBRI/L von Sympatec GmbH als Referenzen gemessen. Bild: Sofiia Dibrova.

In Abbildung 1 sind die Ergebnisse der Untersuchung des Trennverhaltens in einem Siebturm dargestellt. Die Zugabe von HepAc als Additiv zeigte den größten Einfluss auf das Verhalten von Kalkstein und Lactose. Bei der Zugabe von HepAc zu Lactose wurde eine feinere Partikelgrößenverteilung gemessen als bei der Dispergierung der reinen Lactose mit Luft. Im Fall des Kalksteins führte die Zugabe von HepAc auffälligerweise zu einer Zunahme des Rückstands auf den gröberen Sieben. Dies lässt sich auf den hohen Dispergierungsgrad und die zunehmenden Adhäsionskräfte zwischen feinen Partikeln und dem Sieb erklären. Die Staubneigung nahm mit der Erhöhung der Additivkonzentration bei beiden Modellstoffen zu.

Die Zugabe von TTE zur Lactose verbesserte ebenfalls das Trennverhalten, wobei praktisch keine Abhängigkeiten von der Konzentration beobachtet wurden. Die Zugabe von SSF führte zu einer geringfügigen Abnahme der Medianwerte der Partikelgrößenverteilung. Im Gegensatz zur Lactose zeigte die Zugabe von TTE und SSF praktisch keinen Einfluss auf den Kalkstein.

4.1.3 Trennverhalten Zick-Zack-Windsichter

Die Funktion eines Sichterkanals besteht darin, Leichtgut von Schwergut zu trennen. Dabei werden die leichten Partikel oben durch einen Luftstrom ausgetragen und durch einen Zyklon abgeschieden. Die schweren Partikel werden unten aufgefangen. Im Falle der Modellstoffe wurde jedoch praktisch kein Anteil unten aufgefangen, während die Bestimmung der leichteren, nach oben ausgetragenen Fraktion technisch unmöglich war. Somit wurde das Caking-Verhalten an den Wänden des Sichterkanals nur optisch bewertet (siehe Abbildung 2).

Die Abbildung 2 zeigt, dass die Zugabe von 0,1 Gew.-% HepAc zu Lactose zu einer dünneren Anhaftungsschicht führt. Die Zugabe von TTE zu Lactose führt bei Konzentrationen unter 0,3 Gew.-% praktisch zu keinen Anhaftungen an den Wänden des Windkanals. Ebenso zeigen Zugaben von 0,5 bis 1,0 Gew.-% SSF positive Ergebnisse. Bei Kalkstein konnte eine positive Auswirkung nur bei 0,3 Gew.-% HepAc sowie 0,5 bis 1,0 Gew.-% SSF beobachtet werden: wie in Abbildung 3 zu sehen ist, sind weniger Kalksteinstufen bedeckt.

4.1.4 Transportverhalten Vibrationsrinne

Vibrationsrinnen werden traditionell zur kontrollierten Förderung und Dosierung von Schüttgütern eingesetzt. In dieser Untersuchung bestand die Versuchsanordnung aus der Rinne selbst und einem Zuga-betrichter, wodurch das Transportverhalten von beiden Komponenten abhängig war. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die Zugabe von HepAc sowohl zu Lactose als auch zu Kalkstein führte zu einer Verbesserung des Förderverhaltens, indem Materialbrückenbildung im Zuga-betrichter reduziert wurde. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Zugabe von HepAc das Caking-Verhalten beeinflusst. Im Falle von Lactose wurden Ablagerungen am Anfang der Vibrationsrinne anstelle an den Trichterwänden festgestellt. Bei Zugabe von TTE wurde eine starke Abhängigkeit von der Konzentration des Additivs beobachtet. Als Beispiel wurde durch Zugabe von 0,1 Gew.-% TTE die Brückenbildung im Trichter verstärkt im Vergleich zur reinen Lactose, während bei 0,2 Gew.-% TTE (siehe Abbildung 3) die Förderzeit verkürzt werden konnte, und es wurden praktisch keine Ablagerungen beobachtet. Die Zugabe von SSF führte nur zur geringen Verbesserung des Förderverhaltens sowohl von Lactose als auch von Kalkstein.

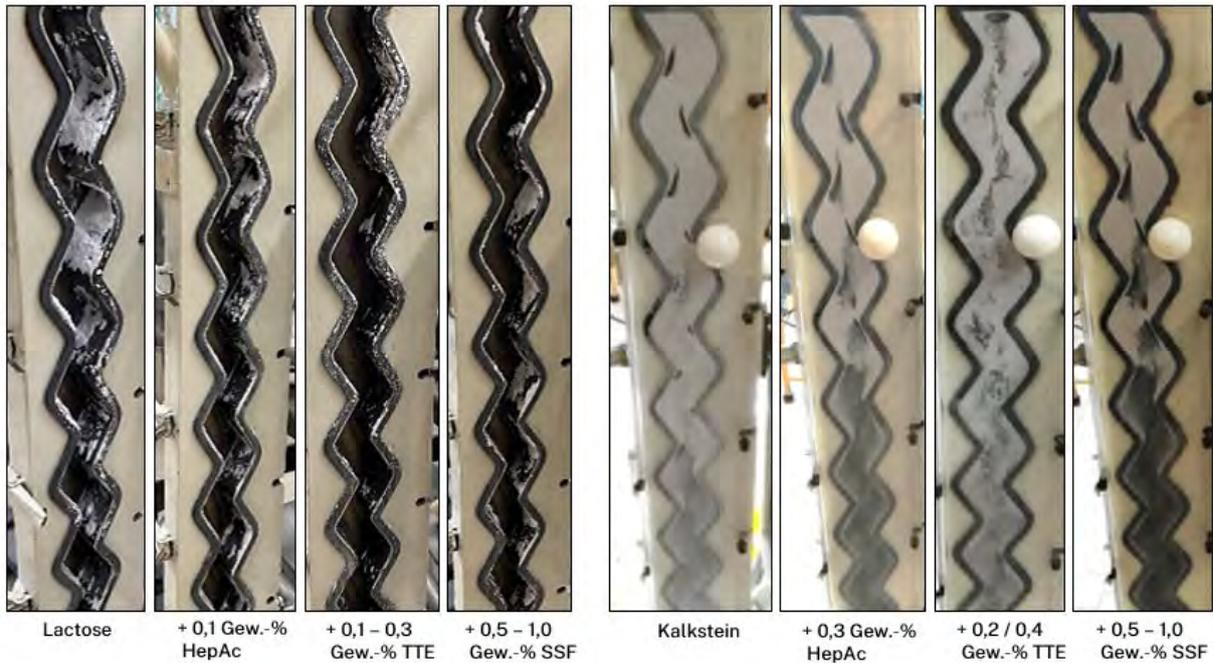


Abbildung 2: Caking an den Wandungen des Zick-Zack-Windsichters bei verschiedener Lactose- und Kalksteinmischungen. Bild: Sofiia Dibrova, Leon Appoldt.

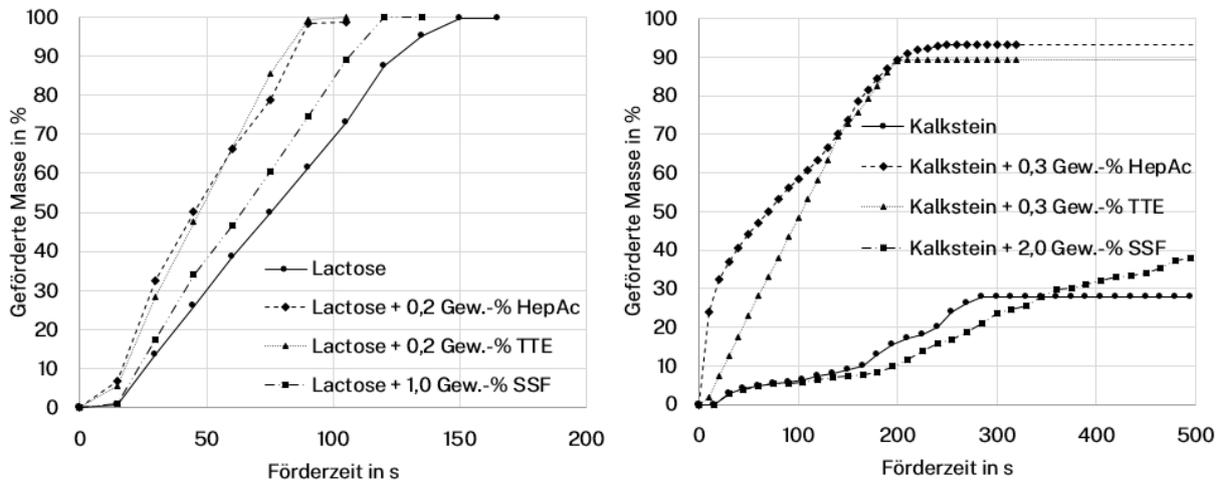


Abbildung 3: Masse der geförderten Lactose und Kalksteins in Abhängigkeit von der Förderzeit. Bild: Sofiia Dibrova.

Alle Pulvermischungen wurden zusätzlich mithilfe der Vibrationsrinne des Zick-Zack-Windsichters untersucht. Dabei wurde ein abweichendes Transportverhalten festgestellt. Dies deutet auf eine Abhängigkeit des Caking-Verhaltens von den Betriebsparametern hin.

4.1.5 Korrelationen mit der Bildanalyse und der Fließfähigkeitsmessung

Die Erfassung der Agglomeratgröße wurde mit der Methode der dynamischen Bildanalyse durchgeführt. Dabei werden die fallenden Partikel beziehungsweise Agglomerate von Kamerasystemen erfasst und mit Analysesoftware bezüglich ihrer Größe analysiert. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Verringerung der Agglomeratgröße sowohl bei Kalkstein als auch bei Lactose nach Zugabe von HepAc. Die Zugabe von TTE und SSF führte zu praktisch keinen Veränderungen bei Lactose und nur zu einer leichten Verringerung bei Kalkstein. Allerdings wurden keine deutlichen Zusammenhänge zwischen der Agglomeratgröße und dem Transport-, Trenn- oder Caking-Verhalten festgestellt.

Zur Bewertung der Fließfähigkeit von Pulvern wurde der Fließfähigkeitsindex ffc nach [25] verwendet, der das Verhältnis zwischen der Verfestigungsspannung und der Druckfestigkeit beschreibt. Die Ergebnisse der Fließfähigkeitsmessungen bei einer geringen Verfestigungsspannung von 2 kPa zeigten ebenfalls keine klaren Korrelationen mit dem Pulververhalten oder der Agglomeratgröße.

Dies ist zum einen auf die Ungenauigkeit der Messungen bei niedrigen Verfestigungsspannungen zurückzuführen und zum anderen auf die Unfähigkeit des eingesetzten Messgerätes zur Messung der Adhäsion im Gegensatz zur Kohäsion.

4.1.6 Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchung verschiedener Additive zeigen, dass es keine optimale Additivkonzentration gibt, die für alle Anwendungen und beide Modellstoffe gilt. Das Pulververhalten sowie die optimale Konzentration variieren stark in Abhängigkeit von den Betriebsparametern, Geometrien und den Wandungsmaterialien. Aufgrund dieser vielfältigen Einflüsse lassen sich keine direkten Zusammenhänge zwischen dem Pulververhalten und beispielsweise der Agglomeratgröße feststellen. Der Einsatz von Fließfähigkeitsmessungen ergibt nur bedingt Sinn, da sich die Testbedingungen erheblich von den Prozessbedingungen unterscheiden. Im Allgemeinen betonen die Ergebnisse dieser Untersuchung die Wichtigkeit der Entwicklung einer neuen praktischen Methode zur Ermittlung des Haftungsverhaltens von luftgetragenen, nicht komprimierten Pulvern unter industrienahen Betriebsbedingungen. In diesem Zusammenhang wurden im Arbeitspaket 2 die ersten Schritte zur Entwicklung eines geeigneten Laborversuchsstandes durchgeführt.

4.2 Entwicklung eines Versuchsstandes

Zur Untersuchung des Haftungsverhaltens von Pulvern wurde der erste Ansatz einer Versuchsanlage entworfen (siehe Abbildung 4).

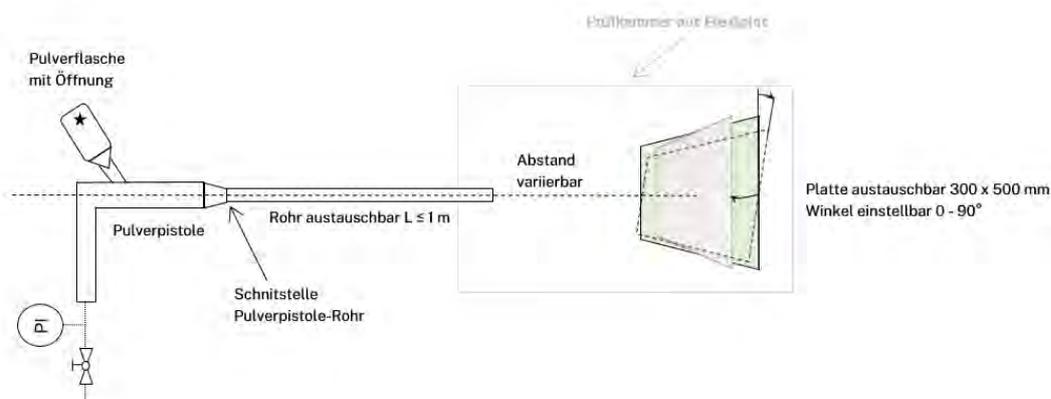


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Versuchsstandes zur Untersuchung des Anhaftungsverhaltens von Pulvern.
Bild: Sofiia Dibrova.

Die in Entwicklung befindliche Anlage besteht anfänglich aus zwei bis drei Hauptkomponenten, die bei Bedarf ausgetauscht werden können. Das Pulver wird in eine Pulverflasche eingefüllt und mithilfe einer Pulverbeschichtungspistole (nach Entfernen des Ladestreifens) fein verteilt, so dass die Partikel an der gegenüberliegenden Wand haften können. Die Distanz zwischen der Pistole und der Wand ist variabel, und die Wandplatten können ausgetauscht oder in unterschiedliche Positionen und Winkel gebracht werden. Darüber hinaus können andere Komponenten in Bezug auf das Adhäsionsverhalten einzeln oder in Kombination getestet werden, wie in Abbildung 4 illustriert.

Während sich die anfänglichen Experimente auf ebene Platten konzentrieren werden, sollen auch andere einfache geometrische Formen wie zum Beispiel Röhren, Rohrbögen, Halbkugeln, sowie unter-

schiedlich gewölbte Oberflächen und Siebgewebe untersucht werden. Dabei werden verschiedene Materialien wie zum Beispiel Stahl, Edelstahl, Aluminium, Plexiglas, Polyvinylchlorid und Polystyrol eingesetzt. Die unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten bei Metallen können durch Polieren erzielt werden.

Weiterhin können die Oberflächen durch Auftragen oder Aufsprühen von Schutzbeschichtungen bearbeitet werden. Durch die Variation von Druck und der Anordnung der Komponenten können verschiedene Aufprallmechanismen wie zum Beispiel Trägheitsabscheidung, Sedimentation oder Impaktion, analysiert werden. Aufgrund der Feinheit der zu verarbeitenden Pulver wird der Versuchstand eingehaust.

Die Weiterentwicklung der Testanlage beinhaltet die Einbettung zusätzlicher Komponenten und Messtechnik. Dabei ist beispielsweise die Messung der Luftgeschwindigkeit oder des Druckabfalls in den Rohren geplant. Zur quantitativen Erfassung der Ablagerungen ist der Einsatz eines Schichtdickemessgeräts vorgesehen, während die Bildung der Schichten mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet werden könnte. Durch die Integration von zum Beispiel Vibrationen oder Ultraschallschwingungen sollen Reinigungsmethoden getestet werden.

Das Ziel dieser Versuchsanlage besteht darin, eine Grundlage für die Entwicklung einer neuen Messprozedur zu schaffen, die eine einfache und schnelle Bewertung des Caking-Verhaltens unter variierenden Betriebsparametern ermöglichen wird. Um dieses Ziel zu erreichen, wird die umfassende Charakterisierung der Pulver in Bezug auf deren Schüttgut- und Oberflächeneigenschaften parallel fortgeführt.

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten erwähnt wurde, kann Caking zu erheblichen wirtschaftlichen Einbußen führen. Daher ist die Vermeidung von Partikelanhaftungen ein zentraler Aspekt, um eine effiziente Produktion, hohe Produktqualität und niedrige Betriebskosten zu gewährleisten. Die bestehenden Lösungen bieten bisher lediglich isolierte Ansätze oder Einzelmaßnahmen. In einem Folgeprojekt soll deshalb ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden, der auf fundierten Erkenntnissen basiert und wirtschaftliche Übertragbarkeit ermöglicht.

Weitere geplante Forschungen sollen insbesondere von Industriepartnern unterstützt werden, die Hinweise zu gebräuchlichen Maschinen, Apparaten oder Betriebsweisen geben können, um realitätsnahe Bedingungen nachzustellen. Nach den anfänglichen Erkenntnissen wird der Fokus auf realen Pulvern oder Pulvermischungen mit Additiven aus den Bereichen der Industriepartner liegen, und konkrete Anwendungsfälle werden untersucht. In Hinblick auf die zukünftige Kooperation wurde zum Beispiel das für diese Vorlaufforschung als Modellstoff eingesetzte mikronisierte Lactose freundlicherweise von MEGGLE GmbH zur Verfügung gestellt.

Eine weitere Kooperationsmöglichkeit besteht im Bereich der DEM-Simulationen, um Einblicke in das Verhalten einzelner Partikel zu gewinnen und ein prädiktives Caking-Modell abzuleiten. Im Allgemeinen ist ein enger fachlicher Austausch mit namhaften Unternehmen in den Bereichen Chemie, Pharma und Lebensmittel in den geplanten Folgeprojekten vorgesehen.

Die in dieser Vorlaufforschung erzielten Ergebnisse wurden auf dem internationalen Kongress für Partikeltechnologie PARTEC 2023 vorgestellt. Ein Abstract wurde eingereicht (siehe [26]) und ein Poster mit dem Titel „Einfluss von Additiven auf die Klassifizierungs- und Transporteffizienz in der Handhabung feiner Pulver“ präsentiert. Die Präsentation künftiger Ergebnisse, die sich aus einem geplanten Folgeprojekt dieser Vorlaufforschung ergeben werden, ist jährlich auf den Fachgruppentreffen für Agglomerations- und Schüttguttechnik der DECHEMA sowie auf internationalen Konferenzen wie CHoPS und Partec geplant.

6 Literatur

- [1] U. Zafar, V. Vivacqua, G. Calvert, M. Ghadiri, und J. A. S. Cleaver, „A review of bulk powder caking“, *Powder Technology*, Bd. 313, S. 389–401, Mai 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2017.02.024.
- [2] „Laktose Marktgröße, Wachstum | Globaler Forschungsbericht [2029]“. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fortunebusinessinsights.com/de/industrie-berichte/laktosemarkt-101774>
- [3] „Produktionsmenge von Stärke und Stärkeerzeugnissen in Deutschland bis 2022“, Statista. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/707829/umfrage/produktionsmenge-von-staerke-und-staerkeerzeugnissen-in-deutschland/>
- [4] „Talkum-Markt - Größe, Anteil & Branchenanalyse“. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/talc-market>
- [5] „Kalksteinmarkt - Größe, Analyse & Produktion in der Welt“. Zugegriffen: 31. Oktober 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mordorintelligence.com/de/industry-reports/limestone-market>
- [6] M. Leturia, M. Benali, S. Lagarde, I. Ronga, und K. Saleh, „Characterization of flow properties of cohesive powders: A comparative study of traditional and new testing methods“, *Powder Technology*, Bd. 253, S. 406–423, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2013.11.045.
- [7] G. Calvert, S. Lawson, und M. Bilton, „Let them beat cake“, *Innovations in Pharmaceutical Technology*, S. 42–45, Apr. 2013.
- [8] M. Röck und J. Schwedes, „Investigations on the caking behaviour of bulk solids — macroscale experiments“, *Powder Technology*, Bd. 157, Nr. 1–3, S. 121–127, Sep. 2005, doi: 10.1016/j.powtec.2005.05.018.
- [9] JoséM. Aguilera, JoséM. Del Valle, und M. Karel, „Caking phenomena in amorphous food powders“, *Trends in Food Science & Technology*, Bd. 6, Nr. 5, S. 149–155, Mai 1995, doi: 10.1016/S0924-2244(00)89023-8.
- [10] V. Karde und C. Ghoroi, „Fine powder flow under humid environmental conditions from the perspective of surface energy“, *International Journal of Pharmaceutics*, Bd. 485, Nr. 1–2, S. 192–201, Mai 2015, doi: 10.1016/j.ijpharm.2015.03.021.
- [11] G. E. Amidon und M. E. Houghton, „The Effect of Moisture on the Mechanical and Powder Flow Properties of Microcrystalline Cellulose“, *Pharm Res*, Bd. 12, Nr. 6, S. 923–929, Juni 1995, doi: 10.1023/A:1016233725612.
- [12] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik 1*. in Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995. doi: 10.1007/978-3-662-08600-1.
- [13] Z. Wang u. a., „Measuring the sticking of mefenamic acid powders on stainless steel surface“, *International Journal of Pharmaceutics*, Bd. 496, Nr. 2, S. 407–413, Dez. 2015, doi:10.1016/j.ijpharm.2015.09.067.
- [14] P. Prziwara, S. Breitung-Faes, und A. Kwade, „Impact of grinding aids on dry grinding performance, bulk properties and surface energy“, *Advanced Powder Technology*, Bd. 29, Nr. 2, S. 416–425, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apt.2017.11.029.
- [15] J. J. Fitzpatrick, K. Barry, P. S. M. Cerqueira, T. Iqbal, J. O’Neill, und Y. H. Roos, „Effect of composition and storage conditions on the flowability of dairy powders“, *International Dairy Journal*, Bd. 17, Nr. 4, S. 383–392, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.idairyj.2006.04.010.
- [16] M. Röck, M. Ostendorf, und J. Schwedes, „Development of an Uniaxial Caking Tester“, *Chem. Eng. Technol.*, Bd. 29, Nr. 6, S. 679–685, Juni 2006, doi: 10.1002/ceat.200600068.

- [17] I. Nikolakakis und N. Pilpel, „Effects of particle shape and size on the tensile strengths of powders“, Powder Technology, Bd. 56, Nr. 2, S. 95–103, Okt. 1988, doi: 10.1016/0032-5910(88)80003-2.
- [18] P. C. Knight und S. H. Johnson, „Measurement of powder cohesive strength with a penetration test“, Powder Technology, Bd. 54, Nr. 4, S. 279–283, Apr. 1988, doi: 10.1016/0032-5910(88)80058-5.
- [19] C. A. Lockemann, „A new laboratory method to characterize the sticking properties of free-flowing solids“, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Bd. 38, Nr. 4–6, S. 301–306, Sep. 1999, doi: 10.1016/S0255-2701(99)00021-5.
- [20] M. -S. Chung, R. R. Ruan, P. Chen, S. -H. Chung, T. -H. Ahn, und K. -H. Lee, „Study of Caking in Powdered Foods Using Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy“, Journal of Food Science, Bd. 65, Nr. 1, S. 134–138, Jan. 2000, doi: 10.1111/j.1365-2621.2000.tb15968.x.
- [21] J. A. S. Cleaver, G. Karatzas, S. Louis, und I. Hayati, „Moisture-induced caking of boric acid powder“, Powder Technology, Bd. 146, Nr. 1–2, S. 93–101, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.powtec.2004.07.005.
- [22] J. Eilbeck, G. Rowley, P. A. Carter, und E. J. Fletcher, „Effect of Materials of Construction of Pharmaceutical Processing Equipment and Drug Delivery Devices on the Triboelectrification of Size-fractionated Lactose“, Pharmacy and Pharmacology Communications, Bd. 5, Nr. 7, S. 429–433, Juli 1999, doi: 10.1211/146080899128735117.
- [23] J. Eilbeck, G. Rowley, P. A. Carter, und E. J. Fletcher, „Effect of contamination of pharmaceutical equipment on powder triboelectrification“, International Journal of Pharmaceutics, Bd. 195, Nr. 1–2, S. 7–11, Feb. 2000, doi: 10.1016/S0378-5173(99)00351-8.
- [24] L. Miethke, P. Prziwara, J. H. Finke, und S. Breitung-Faes, „Opposing Effects of Additives in Dry Milling and Tableting of Organic Particles“, Pharmaceutics, Bd. 13, Nr. 9, S. 1434, Sep. 2021, doi: 10.3390/pharmaceutics13091434.
- [25] A. W. Jenike, „Storage and flow of solids. Bulletin No. 123; Vol. 53, No. 26, November 1964“, NP-22770, 5240257, Nov. 1976. doi: 10.2172/5240257.
- [26] S. Dibrova, L. Appoldt, und S. Breitung-Faes, „Influence of additives on classification and transportation efficiency in fine powder handling“, in Book of abstracts, Nuremberg, Sep. 2023, S. 778–785.

„Sat2Surf – Automatisierte Auswertung von freiverfügbaren Radar-Satellitendaten zur Ermittlung von Hochwasserüberschwemmungsflächen (Surfaces) in großräumigen Skalenbereichen“

Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen

Fakultät Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Lilly Feile

Fakultät Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Michael Kögel, M. Eng.

Fakultät Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fabian Möldner, M. Sc.

Fakultät Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Fabian Teckentrup

Fakultät Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Zusammenfassung:

Die satellitengestützte Bildaufnahme ermöglicht es, weiträumige Untersuchungsgebiete zu erfassen und zu analysieren. In diesem Zusammenhang existiert eine Vielzahl von Satellitensystemen, die durch unterschiedliche Aufnahmemethoden ein breites Spektrum an Datengrundlagen für Untersuchungen liefern können. Im Zuge des Forschungsprojektes „Sat2Surf“ wurden die Möglichkeiten der Wasserflächendetektierung des Erdbeobachtungsprogramm Copernicus (Europäische Weltraumorganisation ESA) untersucht, um die Entwicklung von Überflutungsflächen während eines Hochwasserereignisses analysieren zu können. Die Daten dienen der Validierung von bestehenden Simulationsmodellen und sollen helfen, diese Modelle zu verbessern. Maßgeblich stand in diesem Zusammenhang die Automatisierung der Prozesse im Fokus.

1 Projektdaten

Fördersumme	34.939,42 Euro
Laufzeit	Januar bis November 2023
Fakultät/Einrichtung	Bauingenieurwesen/Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen
Projektteam	Lilly Feile, Michael Kögel, M. Eng., Fabian Möldner, M. Sc., Fabian Teckentrup
Kontakt Daten Projektleitung	dirk.carstensen@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Die Hochwasserereignisse an der Aisch und Zenn, der Fränkischen Rezat, in NRW und Rheinland-Pfalz, in Bayern, Thüringen oder in Sachsen aus dem Juli 2021 haben neben den extremen meteorologischen und hydrologischen Initialen aus der Klimaänderung die Notwendigkeit von zuverlässigen Vorhersagemodellen von Hochwasserereignissen (HWE) verdeutlicht. Das HWE in Mittelfranken vom 9. bis 13. Juli 2021 trägt hier regionalen Charakter. Die Flüsse Aisch, Zenn und Fränkische Rezat sind in diesem Zeitraum deutlich über die Ufer getreten und haben weite Teile der Vorländer überflutet (Abbildung 1). Das Ereignis, welches nach aktuellen Angaben in einigen Bereichen ein hundertjährliches Hochwasser (HQ100) überstieg, war Ursache für großflächige Überflutungen im Bereich des Aischgrundes (etwa 30-35 km westlich von Nürnberg). Trotz der weitläufigen Überflutungen wurden hier im Gegensatz zu anderen Gebieten überschaubare (Sach-) Schäden festgestellt.

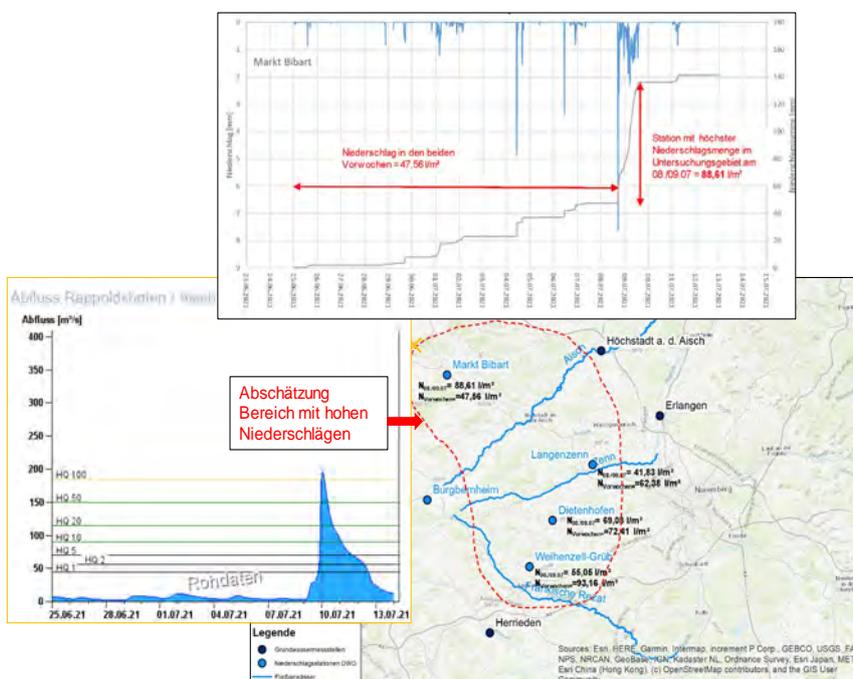


Abbildung 1: Darstellung des vom Hochwasserereignis (09.07.-13.07.2021) betroffenen Gebietes mit Angabe des Niederschlagsvolumens zum Zeitpunkt des Hochwassers sowie in den zwei vorherigen Wochen an unterschiedlichen Messstationen (rechts unten). Grafisch wird das Ereignis anhand des Niederschlagsvolumens an der Station Markt Bibart (oben, mittig) sowie anhand des Abflusses am Messpegel Rappoldshofen/Aisch (links, mittig) dargestellt. Bild: IWWN, HWD, DWD

Großräumige zweidimensionale hydrodynamisch-numerische (2D-HN) Modelle haben eine breite Anwendung im Wasserbau und werden sowohl zur Ereignisanalyse abgelaufener Hochwasserereignisse wie auch zur Ermittlung von Hochwasserrisikomanagementplänen nach EU-Wasserrahmenrichtlinie eingesetzt. Elementare Bedeutung für die Gewährleistung der Modellgüte hat hierbei die Kalibrierung der Hochwassermodelle an Umweltdaten, die als Messwerte vor, während oder nach entsprechenden Ereignissen aufgezeichnet werden. Dies sind beispielsweise Hochwassermarken an Brückenbauwerken oder Gebäuden sowie aufgezeichnete Geschwemmsellinien, die sich an Bäumen oder Infrastruktur ablesen lassen. Aktuell und in der Zukunft muss eine neue Qualität in der Datenbereitstellung beziehungsweise Datenverfügbarkeit eintreten. „Nach dem Hochwasser ist vor dem Hochwasser“ bedeutet, Höhendaten können nicht mehr manuell aufgenommen und Flussgebiete müssen mittels terrestrischer Vermessungen oder langwieriger Laserscan-Befliegungen erfasst werden. Bevor diese Daten erhoben und in Modelle eingespeist sind, könnte schon das nächste Hochwasser eingetreten sein.

An diesem Punkt wurde durch Sat2Surf anhand der Auswertung von Satellitendaten und den daraus resultierenden großflächigen Aufzeichnungen der Erdoberfläche angesetzt. Die Aktualisierung von hydrodynamisch-numerischen Modellen in periodischen oder spontanen Zyklen sowie die großflächige Betrachtung von Auswirkungen ist in Abhängigkeit von den geostationären Umlaufbahnen der Satelliten in enorm kurzen Zeitspannen möglich.

Als Untersuchungsgebiet wurde der Fluss Aisch mit Fokus auf den Bereich der Laufer Mühle festgelegt. In diesem Bereich lagen unterschiedliche Datengrundlagen (unter anderem ein bestehendes und dem IWWN übergebenes 2D-HN-Modell) vor. In enger Absprache mit dem Wasserwirtschaftsamt Nürnberg (WWA-N) konnten entsprechende Abstimmungen erfolgen, weshalb der Bereich zur Durchführung der Untersuchungen besonders geeignet war.

Die Aisch gilt nach Bayerische Staatskanzlei (2010) als Gewässer erster Ordnung. Sie entspringt etwa 1,25 km südsüdöstlich von Schwebheim (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2022). Sie verläuft auf einer Länge von ca. 84,29 km und mündet ca. 2,1 km südsüdöstlich von Buttenheim in die Regnitz. Das Einzugsgebiet der Aisch umfasst 1.006,31 km² (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2016) und ist von einer bäuerlichen Teichlandschaft geprägt (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2011).

Wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt, erfolgten beim Hochwasserereignis (HE) im Juli 2021 großflächige Überflutungen im Bereich der Aisch. In Abbildung 2 werden Luftbildaufnahmen aus diesem HE beispielhaft für den Bereich Laufer Mühle dargestellt.



Abbildung 2: Überflutung der Aisch am 12. Juli 2021 im Bereich der Laufer Mühle (Markierung).
Bilder: Wasserwirtschaftsamt Nürnberg 2021

3 Ziele des Forschungsprojekts

Das Erdbeobachtungsprogramm Copernicus wurde in Zusammenarbeit der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) ins Leben gerufen und hat zum Ziel, aktuelle Umweltinformationen bereitzustellen und eine Datengrundlage für das Katastrophen- und Krisenmanagement in nahezu Echtzeit darzustellen. Das Copernicus-Programm umfasst insgesamt sieben Missionen (Sentinel-1 bis -7), wobei jede der einzelnen Missionen Daten in unterschiedlichen Variationen liefert. In diesen Untersuchungen wurden insbesondere die Daten der Sentinel-1 und -2-Missionen analysiert.

Die Datenaufnahme der Sentinel-1-Missionen erfolgt mittels Radarbildern im sogenannten C-Band-Bereich (Frequenzbereich 5,405 GHz). Es handelt sich um einen SAR-Satelliten (Radar mit synthetischer Apertur; englisch Synthetic Aperture Radar). Mit dieser Aufnahmemethode kann das vom Satelliten ausgesendete Signal eine vorhandene Wolkendecken durchdringen (TARPANELLI ET AL. 2022).

Sentinel-2 ist mit einer Multispektralkamera ausgestattet, die unterschiedliche Farbkanäle empfangen kann. Im Vergleich zu den Sentinel-1-Daten verläuft die Datenerfassung im optisch sichtbaren Bereich, wodurch zusätzliche Analysemöglichkeiten bestehen. Dieses Verfahren hat allerdings den Nachteil, dass die Datenerfassung nicht in der Nacht erfolgen kann und die Datenerfassung im Falle einer Wolkenüberdeckung, wie es meist während eines Hochwasserereignisses der Fall ist, zu unzureichenden Daten führt. Dadurch kann in der Regel ein großer prozentualer Anteil der Hochwasserereignisse nicht erfasst werden (TARPANELLI ET AL. 2022).

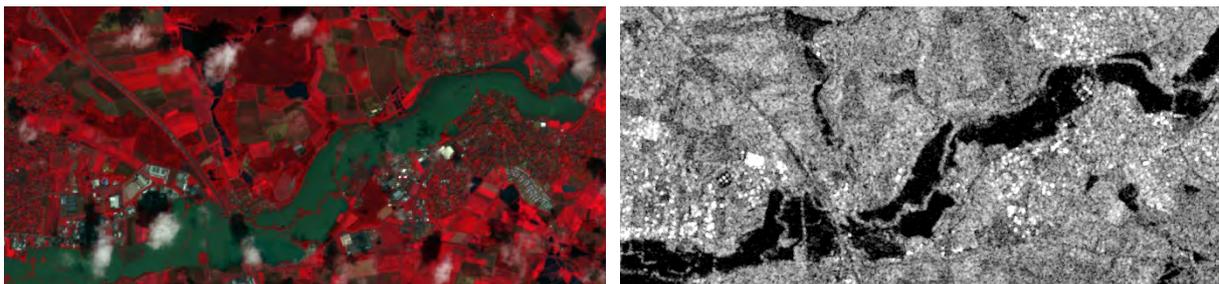


Abbildung 3 Satellitenaufnahmen des Julihochwassers 2021 an der Aisch bei Adelsdorf. Falschfarbenbild im sichtbaren Wellenlängenspektrum (Sentinel-2, links), Wasserflächen türkis-blau dargestellt; (Sentinel-1, rechts) Radarsatellitenaufnahmen, Wasserflächen aufgrund der geringen Rückstreuung schwarz dargestellt. Bild: Auszug aus der Software SNAP

Da hinsichtlich des Datenerfassungsprozesses die kontinuierliche Aufnahme von Hochwasserereignissen unter Verwendung der Sentinel-1-Satelliten zielführender ist, hat man sich in diesem Forschungsprojekt auf die Prozessautomatisierung dieser Daten festgelegt. Die Daten der Sentinel-2-Missionen wurden – falls verfügbar und dafür geeignet – zur Validierung der Ergebnisse verwendet.

Die Satellitendaten werden kostenfrei zur Verfügung gestellt und können explizit für darauf aufbauende Anwendungen weiterverarbeitet werden. Mit den daraus resultierenden Satellitenaufzeichnungen besteht die Möglichkeit, vor oder während eines Hochwassers das Relief oder die Überschwemmungsflächen entlang betroffener Fließgewässer über weite Strecken bis zu mehreren hundert Kilometern und in der Fläche zu detektieren. Ziel von Sat2Surf war es, sämtliche Schritte des Pre- und Post-Processing zu optimieren und zu automatisieren, um die aus den Rohaufnahmen der Satelliten abgeleiteten Überflutungsbereiche als georeferenzierten und möglichst exakten Datensatz zur Weiterverwendung in Geo-Informationssystemen (GIS) und hydraulischen Modellen zur Verfügung stellen zu können.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im ersten Schritt des Forschungsprojektes galt es, die Datenverarbeitung der Satellitenaufnahmen zu verstehen und einen geeigneten Workflow zu entwickeln. Dazu gehörten sowohl die Einarbeitung in entsprechende Softwareanwendungen als auch eine intensive Literaturrecherche.

Die Erfassung von Wasserflächen mittels Sentinel-1-Aufnahmen wird beispielsweise in Bioresita et al. (2018) sowie Shen et al. (2022) erläutert. In Markert et al. (2018) wird zudem die Kombination von optischen und SAR-Satellitendaten diskutiert.

Die Satellitendaten des Copernicus-Programms sind über die ESA-Webseite frei zugänglich und können heruntergeladen werden. Die Verarbeitung der Daten erfolgte durch die Open-source-Software SeNtinel-Anwendungs-Plattform (SNAP). Nach dem Download stehen die Daten im Rohformat und in unterschiedlichen Polarisationsformen zur Verfügung.

In diesem Format sind die Daten unter anderem noch an keinem Koordinatensystem (nicht georeferenziert) und spiegelverkehrt ausgerichtet. Durch unterschiedliche Verarbeitungsschritte gilt es, die Daten zu georeferenzieren und die für die Untersuchungen relevanten Bereiche optisch herauszuarbeiten – unter anderem durch Datenfilterung und Variation der Aufnahmeparameter.

Dafür stehen in der Software SNAP eine Vielzahl von Operationen zur Verfügung. In dem in Abbildung 4 dargestellten Standard-Workflow werden die Rohdaten der Sentinel-1-Aufnahme eingelesen (Read), gefiltert (ThermalNoiseRemoval, Remove-GRD-Border-Noise, Speckle-Filter), etwaige Lage- und Ausrichtungsungenauigkeiten korrigiert (Apply-Orbit-File), die Datensignale kalibriert (Calibration) und konkretisiert (LinearToFromdB) und mehrere Aufnahmen miteinander überlagert (CreateStack). Abschließend wird der Datensatz auf die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes reduziert (Subset) und etwaige Verzerrungen rückgerechnet (Terrain-Correction). Nach erfolgreicher Verarbeitung können die Daten in bestehende Geoinformationssysteme (GIS) eingearbeitet werden, wodurch sie mit GIS-Datensätzen aus anderen Datenquellen zusammengeführt werden können.

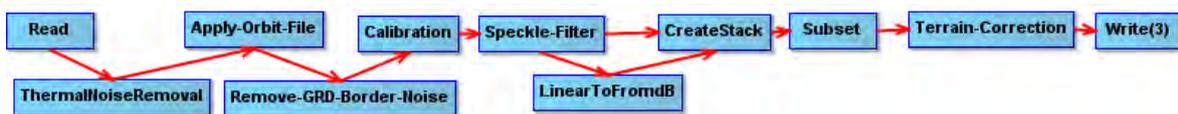


Abbildung 4: Standard-Workflow zur Verarbeitung von Sentinel-1-Rohdaten. Bild: Auszug aus der Software SNAP

Wasserflächen haben die Eigenschaft, eingehende elektromagnetische Wellen/Radarsignale zu zerstreuen. Im Falle der Sentinel-1-Aufnahmen bedeutet das, dass die vom Satelliten ausgesendeten Signale von Wasserflächen so abgelenkt werden, dass das Reflexionssignal nicht, beziehungsweise nur deutlich schwächer, zum Satelliten zurückgelangen kann. Das Ergebnis ist, dass die Satellitenaufnahmen in diesen Bereichen nahezu keine Daten beinhalten. Dieser normalerweise negative Aspekt wird bei der Verarbeitung der Daten genutzt, um Wasserflächen zu detektieren.

Zur Ableitung der Wasserflächen können unterschiedliche Ansätze Anwendung finden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden nachfolgende Auswertungstools angewendet und miteinander verglichen:

4.1 Ermittlung anhand des Grenzwertes der Signalintensität

Wie vorher beschrieben, besitzt das Reflexionssignal von Wasserflächen eine äußerst geringe Intensität. Durch Definition eines Intensitätsgrenzwertes lässt sich das Gebiet auf dieser Grundlage in die Bereiche Wasser/Nicht-Wasser einteilen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Einteilung mit relativ geringem Aufwand erfolgen kann. Die Festlegung gestaltet sich mitunter als schwierig, da die Signalintensität zwischen jeder Aufnahme eines Sentinel-Satelliten variiert, weshalb bei jeder Untersuchung eine neue Analyse und Festlegung des Grenzwertes erfolgen müssen. Dieser Umstand macht eine Automatisierung des Prozesses auf dieser Auswertungsgrundlage nur schwierig möglich.

4.2 K-Means (KM) Cluster Analysis

K-Means-Clustering ist eine Methode des unüberwachten Lernens, bei der ähnliche Datenpunkte in Gruppen oder Cluster organisiert werden. Beim unüberwachten Lernen bedeutet dies, dass der Algorithmus keine vorherigen Informationen über die Zuordnung der Datenpunkte zu Kategorien hat. Das Ziel des K-Means-Clustering-Algorithmus ist es, die Daten so zu gruppieren, dass Punkte innerhalb eines Clusters möglichst ähnlich sind und sich gleichzeitig von Punkten in anderen Clustern unterscheiden. Wie bereits bei der vorherigen Ermittlungsweise beschrieben, ist die Automatisierung dieses Prozesses schwierig, da sich die einzelnen Satellitenaufnahmen meist voneinander unterscheiden.

4.3 Random Forest Classification

Die Random Forest Classification ist ein maschinelles Lernverfahren, das viele Entscheidungsbäume (Forest) erstellt und kombiniert, um genauere Vorhersagen zu treffen. Jeder Baum wird auf unterschiedlichen Teilmengen der Daten trainiert, und die Ergebnisse werden dann kombiniert, um robustere und zuverlässigere Ergebnisse zu erzielen. Das „Anlernen“ des Algorithmus erfolgt „beaufsichtigt“ (supervised). Das bedeutet, dass dem Klassifizierungstool vom Anwender Trainingsdaten übergeben werden. Diese Daten werden vom Tool verarbeitet, wodurch die Software „lernt“, wie auf Sentinel-1-Aufnahmen Wasserflächen von Nicht-Wasserflächen zu unterscheiden sind. Ist das Tool erfolgreich „trainiert“, kann es auf eine Vielzahl von Aufnahmen (parallel) angewendet werden. Die Möglichkeit, das Trainieren eigenständig zu beaufsichtigen und dadurch zu optimieren, bietet ein sehr großes Potenzial für die Automatisierung und führt zu guten Ergebnissen. Der Trainingsprozess kann unter Umständen allerdings sehr zeitintensiv sein.

Im Rahmen der Untersuchungen hatte sich herausgestellt, dass die Random Forest Classification zu den besten Ergebnissen bei der Identifikation von Wasserflächen führte, weshalb der Fokus bei der Entwicklung von Automatisierungsprozessen ausschließlich auf dieser Methode lag.

Ohne auf die einzelnen Verarbeitungsschritte genauer einzugehen, wird der Bearbeitungsablauf in Abbildung 5 dargestellt. Der Ablauf konnte so weit automatisiert werden, dass die Rohdaten aus den Sentinel-1-Aufnahmen gefiltert, ausgerichtet (georeferenziert), optimiert und klassifiziert werden, ohne dass die Verarbeitungssoftware geöffnet werden muss, da die Befehle ausschließlich über die Kommandozeile des Windows Betriebssystems ausgeführt wurden. Dadurch können diese sehr zeitintensiven Verarbeitungsprozesse anhand einer Vielzahl von Satellitenaufnahmen parallel durchgeführt werden, wodurch eine enorme Zeitersparnis für künftige satellitengestützte Untersuchungen erreicht wurde.

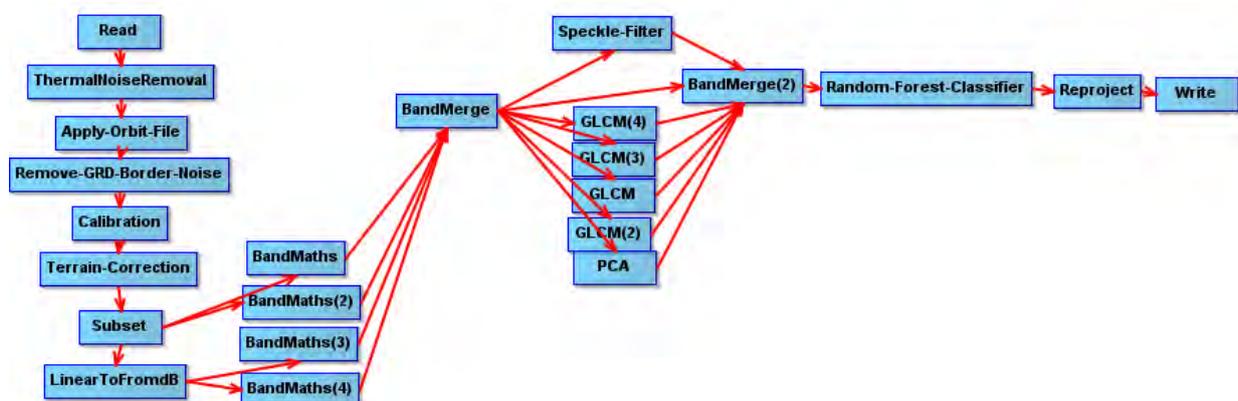


Abbildung 5 Automatisierter Verarbeitungsprozess zur Ermittlung von Überflutungsflächen aus Sentinel-1-Aufnahmen mittels Random Forest Classification. Bild: Auszug aus der Software SNAP

Wie bereits erwähnt, wurde dem IWWN im Zuge dieser Untersuchungen vom WWA-N ein 2D-HN-Modell der Aisch im Bereich übergeben. Mit diesem Modell sowie mit den Angaben der Messpegelstände entlang des Gewässers konnte das Hochwasserereignis vom Juli 2021 nachgerechnet werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen (Überflutungsflächen) konnten den Ergebnissen der automatisierten Satellitendatenauswertung gegenübergestellt werden. Die Gegenüberstellung findet beispielhaft in Abbildung 6 statt.

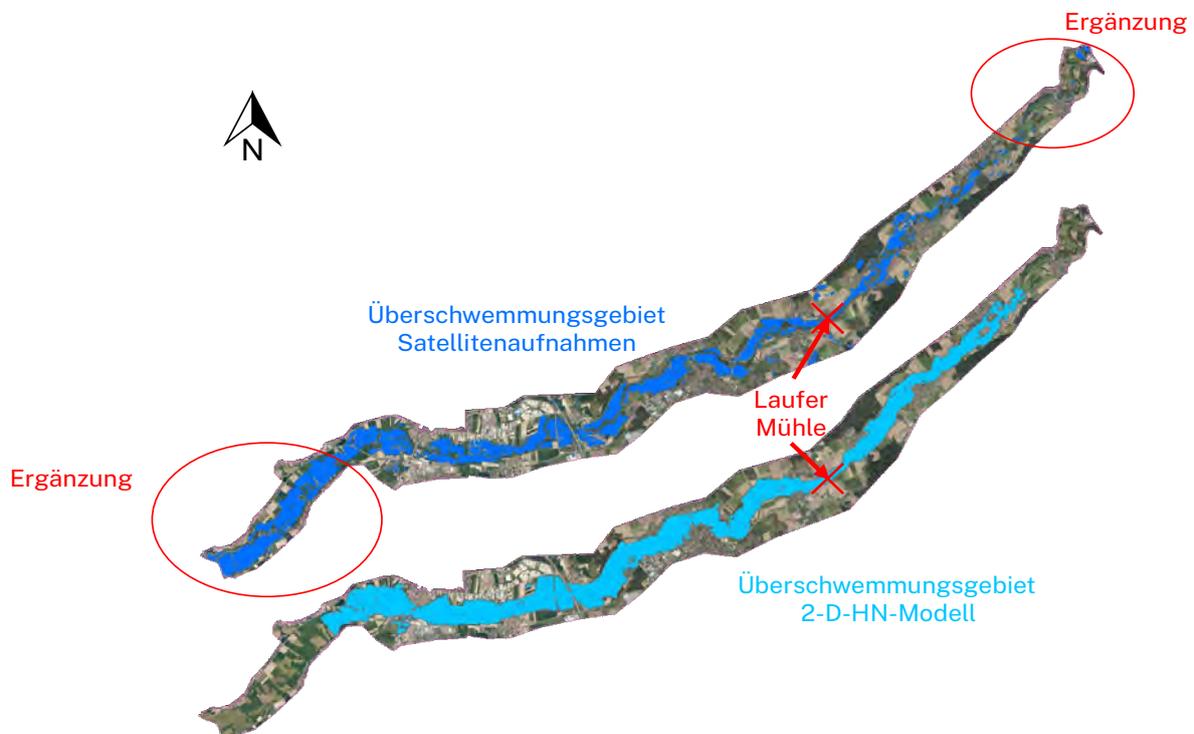


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Wasserflächen aus den 2D-HN-Untersuchungen mit der aus einer Sentinel-1-Aufnahme ermittelten während des Hochwasserereignisses im Juli 2023 an der Aisch mit Kennzeichnung von ergänzten Bereichen und der Lokalisierung der Laufer Mühle (eigene Abbildung mit Überlagerung von Kartenansichten (Orthofoto). Bild: Bayerische Vermessungsverwaltung (2023)

Abbildung 6 zeigt, dass aus den Satellitenaufnahmen im Bereich der Aisch erfolgreich Wasserflächen abgeleitet werden konnten. Im Vergleich zu den Ergebnissen der 2D-HN-Berechnungen konnten die Flächen in Bereichen flussab beziehungsweise flussauf dargestellt werden, die aufgrund der Modellgrenzen des 2D-HN-Modells dort nicht abgebildet werden.

Bei genauer Betrachtung zeigen sich in einigen Bereichen Unterschiede in der Ausdehnung der Überflutungsflächen. Grund dafür kann zum einen die geringe Auflösung der Satellitenbilder sein (pro Pixel werden 10 m² Fläche abgebildet). Dadurch können insbesondere die Randbereiche der Wasserflächen nicht ausreichend aufgelöst werden. Zusätzlich befindet sich in diesen Bereich häufig Vegetation, welche die Wasserfläche überdeckt, wodurch in den Satellitenaufnahmen keine Wasserfläche detektiert werden kann. Abweichungen können allerdings auch seitens der Numerik bestehen, wobei ungenaue Abbildungen der Geländebeschaffenheit zu Abweichungen führen können.

Da die Auflösung der Satellitendaten verhältnismäßig gering ist, um die Überflutungsflächen im Gelände mit ausreichender Genauigkeit darzustellen, gilt es, in künftigen Untersuchungen Optimierungen anzustreben. Denkbar ist beispielsweise der Verschnitt der Überflutungsdaten mit bestehenden Geländemodellen, um erkennen zu können, welche minimalen Geländehöhen von Wasser bedeckt sind. Dadurch können Bereiche, die diese Geländehöhe unterschreiten und auf den Satellitendaten nicht als Wasserfläche gekennzeichnet sind, nachträglich als überfluteter Bereich definiert werden. Durch diesen Interpolationsprozess können möglicherweise bessere Ergebnisse erzielt werden. Dies gilt es allerdings, in künftigen Untersuchungen zu betrachten, beziehungsweise zu entwickeln.

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes konnte ein automatisierter Workflow entwickelt werden, durch den mit verhältnismäßig geringem Zeitaufwand Sentinel-1-Satellitendaten verarbeitet und daraus Wasserflächen abgeleitet werden können. In diesem Zuge ist es möglich, sowohl langjährige Zeitreihen (seit Beginn der Sentinel-1-Aufnahmen im Jahr 2015) als auch aktuelle Ereignisse auszuwerten. Auf der Basis dieser Wasserflächen können numerische Modelle evaluiert werden. Da die Aufnahmen (mit einigen Ausnahmen) weltweit angefertigt werden, sind die Möglichkeiten des Einsatzes nicht lokal beschränkt.

Diese Daten und die daraus abgeleiteten Wasserflächen können im Anschluss serverbasiert für die tägliche Arbeit (Flussgebietsmanagement) ebenso wie in Extremfällen von Behörden (Wasserwirtschafts-/Umweltämtern), wasserwirtschaftlich tätigen Ingenieur- und Planungsbüros sowie in der Forschung verwendet werden. Insbesondere im Zeitalter der Digitalisierung wird dadurch langfristig eine umfangreiche Datengrundlage geschaffen, wodurch unterschiedlichste Anwender ihre Prognose- und Analysemethoden validieren und kalibrieren können.

6 Literaturverzeichnis

Bayerische Staatskanzlei (2010): Anlage 1 BayWG - Verzeichnis der Gewässer erster Ordnung. Online verfügbar unter https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayWG-ANL_1, zuletzt geprüft am 26.08.2022.

Bayerische Vermessungsverwaltung (2023): GeoBasis-DE / BKG 2021/2023 - Daten verändert. Digitale Orthophoto der Bayerischen Vermessungsverwaltung, Datenbezug: 2023.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2011): Entwurf einer kulturlandschaftlichen Gliederung Bayerns als Beitrag zur Biodiversität. 17 Aischgrund. Online verfügbar unter

<https://www.lfu.bayern.de/natur/kulturlandschaft/gliederung/doc/17.pdf>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016): Verzeichnis der Bach- und Flussgebiete in Bayern. Flussgebiet Main. Online verfügbar unter

<https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaesserverzeichnisse/doc/tab24.pdf#page=70>, zuletzt geprüft am 25.08.2022.

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2022): Angewandte Geologie. Ursprung der Aisch WSW von Illesheim. Online verfügbar unter

https://www.umweltatlas.bayern.de/mapapps/resources/reports/sb_geotope/generateBericht.pdf?additionalayerfieldvalue=575Q003, zuletzt aktualisiert am 25.08.2022.

Bioresita, Filsa; Puissant, Anne; Stumpf, André; Malet, Jean-Philippe (2018): A Method for Automatic and Rapid Mapping of Water Surfaces from Sentinel-1 Imagery. In: Remote Sensing 10 (2), S. 217. DOI: 10.3390/rs10020217.

Markert, Kel N.; Chishtie, Farrukh; Anderson, Eric R.; Saah, David; Griffin, Robert E. (2018): On the merging of optical and SAR satellite imagery for surface water mapping applications. In: Results in Physics 9, S. 275–277. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.02.054.

Shen, Guozhuang; Fu, Wenxue; Guo, Huadong; Liao, Jingjuan (2022): Water Body Mapping Using Long Time Series Sentinel-1 SAR Data in Poyang Lake. In: Water 14 (12), S. 1902. DOI: 10.3390/w14121902.

Tarpanelli, Angelica; Mondini, Alessandro Cesare; Camici, Stefania (2022): Effectiveness of Sentinel-1 and Sentinel-2 for Flood Detection Assessment in Europe. PREPRINT!

Wasserwirtschaftsamt Nürnberg (2021): Luftbilder HW2021.

BattELAnalytik – Analytik von Alterungsprozessen in Lithiumionen-Elektrolyten für Nutzfahrzeuganwendungen

Prof. Dr. Maik Eichelbaum

Fakultät Angewandte Chemie/Institut für Angewandte Wasserstoffforschung,
Elektro- und Thermochemische Energiesysteme (H₂Ohm)

Syaleen Fairuzza Binti Sharuddin, M. Sc.

Fakultät Angewandte Chemie

Zusammenfassung:

Im Forschungsprojekt konnten verschiedene Alkylcarbonat-basierte Batterieelektrolyte mit LiClO₄ als Leitsalz in einem neu aufgebauten, elektrochemischen Teststand untersucht werden. Als Parameter zur Charakterisierung der Elektrolyte wurden die temperaturabhängige Leitfähigkeit mit elektrochemischer Impedanzspektroskopie sowie das elektrochemische Stabilitätsfenster mit Cyclovoltammetrie ermittelt. Die thermische und elektrochemische Alterung konnte ebenfalls in diesem Teststand umgesetzt und mit Cyclovoltammetrie nachgewiesen werden.

Damit wurden die Grundlagen gelegt, um zukünftig den Einfluss frischer sowie thermisch beziehungsweise elektrochemisch gealterter Elektrolyte auf die Leistungsfähigkeit von Batterien für den Nutzfahrzeugbereich zu untersuchen.

1 Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Institut für Angewandte Wasserstoffforschung, Elektro- und Thermochemische Energiesysteme (H ₂ Ohm)
Projektleitung	Prof. Dr. Maik Eichelbaum
Kontakt Daten Projektleitung	maik.eichelbaum@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Im Zuge der Energie- und Verkehrswende sind Batterien beziehungsweise (wiederaufladbare) Sekundärbatterien/Akkumulatoren als wesentlicher Energiespeicher in stationären und mobilen Anwendungen nicht mehr wegzudenken [1]. Trotz einiger Nachteile hinsichtlich der relativ geringen Energiedichte und dem großen Ressourcenbedarf bei der Herstellung werden Batteriespeicher sowohl in der kurzfristigen Stromspeicherung von Lastspitzen bei Windkraft- und Photovoltaikanlagen als auch im Einsatz in PKWs und leichten Nutzfahrzeugen generell favorisiert. Ursache ist der vergleichsweise hohe Wirkungsgrad bei der Speicherung von (erneuerbarem) Strom und der anschließenden Umwandlung dieser elektrischen Energie in Bewegungsenergie durch einen Elektromotor.

Erwähnt werden muss zudem, dass auch in Fahrzeugen, die Wasserstoff-Brennstoffzellen zur Energiespeicherung beziehungsweise -umwandlung nutzen, eine Batterie erforderlich ist. Brennstoffzellen zeigen in der Regel ein schlechtes Kaltstartverhalten und sie verhalten sich träge unter abrupten Lastwechseln. In diesen Grenzfällen versorgt die Batterie den Elektromotor mit elektrischer Energie [2]. Demzufolge spielen Batterietechnologien in fast jedem denkbaren Szenario zukünftiger Antriebskonzepte eine entscheidende Rolle.

Im Verkehrssektor hat sich bei batterieelektrischen Antrieben fast einhellig der Lithiumionen-Akku(mulator) aufgrund seiner für Batterien relativ hohen volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte, der hohen Zellspannung sowie einer vergleichsweise hohen Langzeitstabilität und -sicherheit durchgesetzt. Dieser Akkutyp besteht im Wesentlichen aus einer Lithiumionenhaltigen Metalloxidkathode, einer Graphitanode, einem Lithiumsalzhaltigen Elektrolyten (meistens LiPF₆ in einer binären Mischung aus zyklischen und linearen organischen Carbonaten) und einem Lithiumionen-durchlässigen Separator [3]. Beim Entladen dieses Akkus wird das in der Anode eingelagerte Lithium in Form von Lithiumkationen freigesetzt, diffundiert durch den Elektrolyten und den Separator zur Kathode, und wird dort unter Reduktion des Kathodenmetalloxids eingelagert.

Dieser Prozess verläuft spontan, es wird also Energie frei. Durch die Einbindung von Kathode und Anode in einen externen Stromkreis kann der resultierende Elektronenfluss in Form elektrischer Energie zum Beispiel zum Betrieb eines Elektromotors genutzt werden. Beim Aufladen des Akkus wird dieser Prozess durch Anlegen einer externen Spannung umgekehrt.

Der Lithiumionen-Akku ist in einem batterieelektrischen Fahrzeug die kapitalintensivste Komponente [4]. Ein sicherer Betrieb, lange Lebensdauer sowie hohe Robustheit – auch bei schnellem (Ent-)Laden unter hohen (Ent-)Ladeleistungen – sind entscheidend für die Wirtschaftlichkeit dieser Antriebstechnik. Insbesondere der an diese Anforderungen maßgeschneiderte Elektrolyt spielt bei all diesen Punkten eine bedeutende Rolle [5]. So muss die Grenzfläche zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten – die sogenannte solid electrolyte interphase (SEI) an der Anode und die cathode

electrolyte interphase (CEI) an der Kathode – für Lithiumionen durchlässig (hohe Ionenleitfähigkeit), aber für Elektronen undurchlässig sein (niedrige elektrische Leitfähigkeit). Die Schichten müssen zudem die weitere Reaktion von Lösungsmittelmolekülen aus dem Elektrolyten mit der Elektrode verhindern (Passivierung beziehungsweise Verhinderung von Korrosionsreaktionen).

CEI und SEI bilden sich während der ersten Zyklen im Betrieb der Batterie aus, wobei insbesondere die SEI aus Zersetzungsprodukten des Elektrolyten gebildet wird [6]. Für eine hohe Lebensdauer der Zelle sind daher sowohl ein Auflösen dieser Grenzflächenschichten als auch eine darüberhinausgehende Zersetzung des Elektrolyten zu vermeiden.

Die genauen Zusammenhänge zwischen der Zersetzung des Elektrolyten und der Leistung der Batterie im Laufe der Lebensdauer sind jedoch noch weitgehend ungeklärt. Insbesondere zur Aufklärung der Prozesse unter hohen Lasten und bei schnellen Ladeprozessen an Hochleistungs-ladestationen im Mittel- und Hochspannungsbereich, wie sie für Nutzfahrzeuge erforderlich sind und zu denen es fast keine Erfahrungen gibt, besteht aktuell ein immenser Forschungsbedarf, da in den nächsten Jahren viele neue batterieelektrische Nutzfahrzeuggenerationen auf den Markt kommen werden.

Grundsätzlich wird dabei zwischen thermischer und elektrochemischer Elektrolytalterung unterschieden. Eine Zersetzung des Elektrolyten kann zu einer erschwerten Diffusion der Lithiumionen führen, was zu verringerten Zellspannungen und längeren Ladezeiten durch einen höheren Ohmschen Zellwiderstand führt [7]. Im Extremfall kann aus der mit der Elektrolytzersetzung verbundenen Gasentwicklung das Batteriemodul bersten, wobei es zur Freisetzung hochtoxischer Gase kommen kann [8]. Eine Überladung der Kathode kann wiederum zur Freisetzung von Sauerstoffgas führen, das in einer exothermen Reaktion mit dem Elektrolyten reagiert, wobei die freiwerdende Wärme die Reaktion weiter beschleunigt, bis die Batterie ab einer bestimmten Temperatur wortwörtlich durchbrennt („thermal runaway“) [9].

3 Ziele des Forschungsprojekts

Das Forschungsprojekt soll die Grundlagen zur Untersuchung der Zersetzung von Batterieelektrolyten aus batterieelektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen erarbeiten. Zur Charakterisierung der Transporteigenschaften verschiedener Elektrolytlösungen soll der temperaturabhängige Parameter Leitfähigkeit mit elektrochemischer Impedanzspektroskopie ermittelt werden. Mit Cyclovoltammetrie soll das Stabilitätsfenster der Elektrolytlösungen untersucht werden. Die Elektrolytlösungen sollen zudem künstlich thermisch und elektrochemisch gealtert werden. Die Zersetzung soll wiederum mit Cyclovoltammetrie nachgewiesen werden.

Perspektivisch sollen durch Einfüllen des Elektrolyten in Batterietestzellen der Einfluss der jeweiligen Alterung auf die Leistungsfähigkeit einer Batterie durch Aufnahme von Lade- und Entladezyklen untersucht werden. Die Vergleichbarkeit mit realistischen Anwendungsszenarien soll zukünftig durch parallele Messungen von in Prüfständen und Feldtests gealterten Batterien beziehungsweise Batterieelektrolyten erfolgen. Mit diesen Erkenntnissen sollen optimale Betriebsbedingungen und der mögliche Zusatz von Elektrolytadditiven getestet sowie völlig neue Elektrolytsysteme einschließlich innovativer Festelektrolyte zur Steigerung der Kapazität und Lebensdauer der Batterie entwickelt werden.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

4.1 Herstellung der Elektrolytlösungen

Im Forschungsprojekt wurden verschiedene reine und gemischte Batterieelektrolyte auf Basis der organischen Carbonate Ethylencarbonat (EC), Dimethylcarbonat (DMC) und Propylencarbonat (PC), jeweils versetzt mit Lithiumperchlorat LiClO_4 als Leitsalz untersucht. In kommerziellen Lithiumionen-Batterien wird meistens LiPF_6 als Leitsalz verwendet. Dieses ist jedoch sehr hydrolyseempfindlich und kann sich dann unter Bildung von hochgiftigem HF zersetzen. Deshalb wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts das hydrolysestabile LiClO_4 als Leitsalz verwendet. Für die Versuche wurden die folgenden binären Carbonatgemische, sowie zum Vergleich auch die entsprechenden Elektrolyte aus den reinen Carbonaten hergestellt.

- 1 M LiClO_4 in EC:DMC (1:1)
- 2 M LiClO_4 in EC:DMC (1:1)
- 1 M LiClO_4 in EC:PC (1:1)
- 1 M LiClO_4 in PC:DMC (1:1)
- 1 M LiClO_4 in DMC
- 1 M LiClO_4 in PC

Da reines EC bei Raumtemperatur fest ist, wurde es nicht als reine Carbonatlösung verwendet. Als Bestandteil binärer Gemische wurde es zuvor in einem warmen Bad verflüssigt und danach mit dem zweiten Carbonat vermischt, in dem es sich vollständig aufgelöst hat.

4.2 Bestimmung der temperaturabhängigen Leitfähigkeit

Die temperaturabhängige Leitfähigkeit des Elektrolyten ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit einer Batterie. Diese sollte möglichst hoch sein, um beim Laden und Entladen durch einen geringen ohmschen Widerstand die energetischen Verluste gering zu halten. Die Leitfähigkeit wurde mit elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS) in der in Abbildung 1 dargestellten Testzelle ermittelt. Diese besteht aus dem Microcell HC stand (rhd instruments), einem PGSTAT204 Potentiostat/Galvanostat (Metrohm Autolab), ausgestattet mit einem FRA32M Modul und einem Eurotherm-Temperaturregler.

Zunächst musste die sogenannte Zellkonstante K_{cell} mit einem Leitfähigkeitsstandard ermittelt werden. Hierzu wurde 1 Milliliter einer 0,01 M KCl-Standardlösung in die TSC 1600 GC Messzelle (rhd Instruments) unter Inertgas (Argon) gefüllt. Für die Messung wurde ein Zwei-Elektroden-Setup mit einer Glaskohlenstoffelektrode (glassy carbon, GC) als Arbeitselektrode (working electrode, WE) und Platin als Gegenelektrode (counter electrode, CE) verwendet. Die EIS-Referenzmessung wurde im potentiostatischen Modus am Leerlaufpotential (open circuit potential, OCP) im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 1 kHz bei einer Amplitude von 50 mV und einer Temperatur von 25 °C durchgeführt.

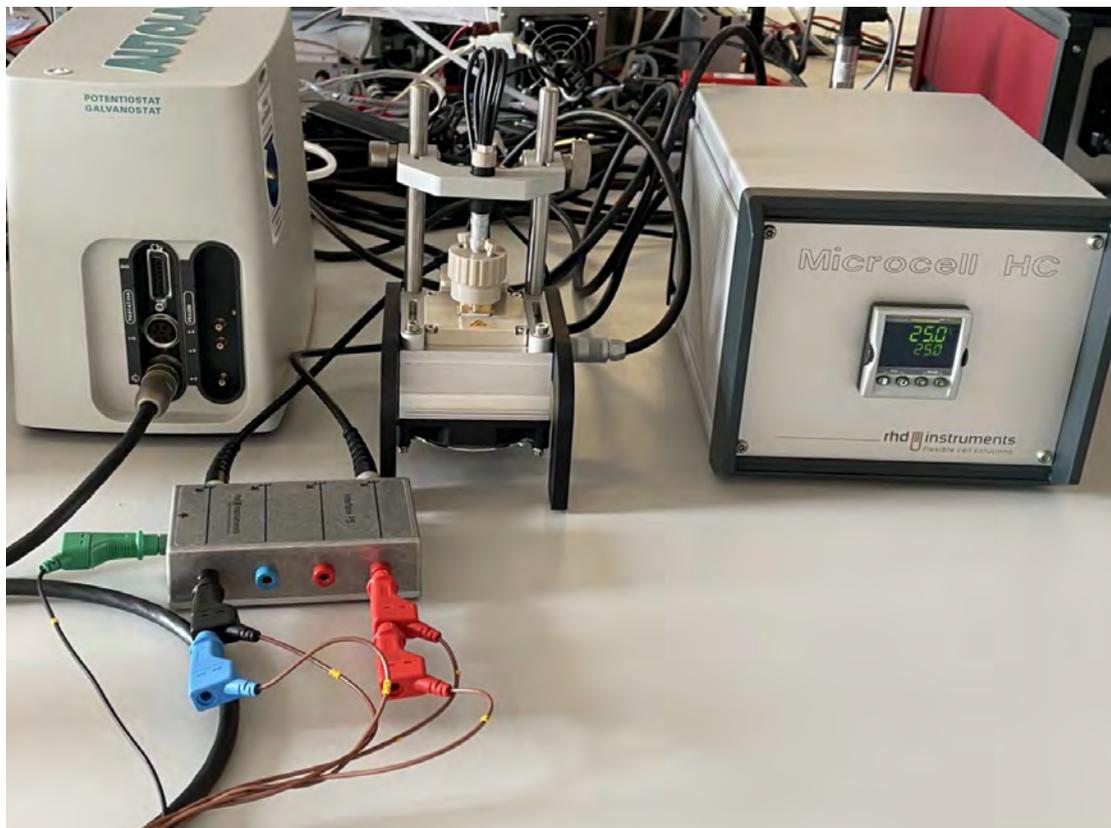


Abbildung 1: Teststand zur elektrochemischen Charakterisierung und Alterung von Batterieelektrolyten.
Bild: Syaleen Fairuzza Binti Sharuddin

Das mit dem Standard gemessene Impedanzspektrum wurde mit einem Ersatzschaltbild bestehend aus einem ohmschen Widerstand, der in Reihe mit einem Constant Phase Element geschaltet ist, gefittet, um damit den ohmschen Widerstand R_s der untersuchten Standardlösung zu erhalten. Die Zellkonstante wurde schließlich über die folgende Formel erhalten, wobei σ die (bekannte) Leitfähigkeit der Standardlösung (12,8 mS/cm) ist.

$$K_{cell} = R_s \cdot \sigma \quad (1)$$

Über den erhaltenen Widerstand von $96,7 \Omega$ konnte als Zellkonstante der Wert $1,24 \text{ cm}^{-1}$ ermittelt werden.

Anschließend wurde die temperaturabhängige Leitfähigkeit der hergestellten Batterieelektrolytlösungen im Bereich zwischen $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ mit dem in Abbildung 1 gezeigten Teststand und der Messzelle TSC 1600 GC bestimmt.

Es wurden jeweils 1 mL des Elektrolyten unter Argon-Atmosphäre in die Messzelle eingefüllt. EIS-Messungen wurden im Frequenzbereich zwischen 1 Hz und 1 MHz am OCP und bei einer Amplitude von 10 mV durchgeführt. Die Bode-Diagramme der temperaturabhängigen Impedanzspektren für die binären Elektrolytgemische sind in Abbildung 2 dargestellt. Über alle Temperaturen hinweg ist das Impedanzverhalten im Frequenzbereich von etwa 1 MHz bis hinunter zu 10 kHz in erster Linie auf die Ionenmigration innerhalb des Elektrolyten zurückzuführen. Diese Eigenschaft wird durch das breite Plateau in den Bode-Diagrammen belegt, wobei der Plateauwert den Widerstand für die Ionenbewegung anzeigt. Wenn die Temperatur steigt, steigt auch die Leitfähigkeit des Elektrolyten, was zu einer allmählichen Verringerung des Plateauwertes der Impedanz führt. Bei niedrigeren Frequenzen ist ein Anstieg des Realteils der Impedanz zu erkennen, der auf die Elektrodenpolarisation zurückzuführen ist.

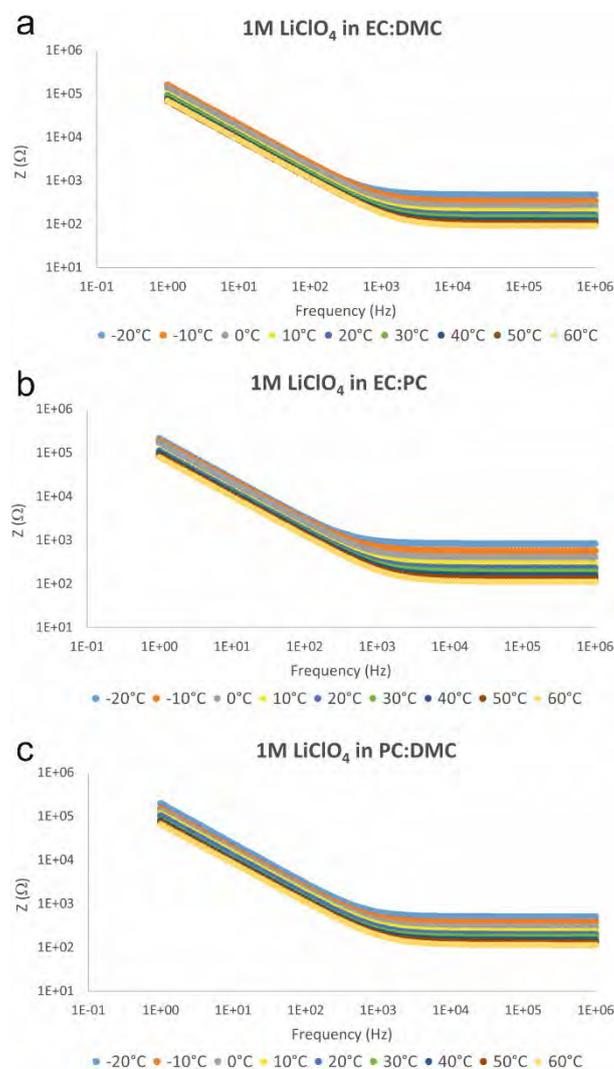


Abbildung 2: Temperaturabhängige Impedanz (Bode-Diagramme) verschiedener Batterieelektrolytlösungen.
Bild: Syateen Fairuzza Binti Sharuddin

Die Berechnung der Leitfähigkeit der Elektrolyte erfolgte durch Umstellung der Gleichung (1) nach der Leitfähigkeit σ und Einsetzen der zuvor ermittelten Zellkonstante. Der ohmsche Widerstand R_s wurde durch Fitten des für den Elektrolyten bei der entsprechenden Temperatur jeweils gemessenen Impedanzspektrums mit demselben Ersatzschaltbild wie bei der Ermittlung der Zellkonstante bestimmt. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse in Form von Arrhenius-Diagrammen.

Diese weisen eine ausgeprägte Krümmung in der Temperaturabhängigkeit der Ionenleitfähigkeit auf. Die Abweichung vom idealen linearen Verhalten deutet auf einen Wechsel des Leitfähigkeitsmechanismus bei höheren Temperaturen hin. Die Leitfähigkeit nimmt generell bei höheren Temperaturen zu. Der Elektrolyt, bestehend aus 1M LiClO₄ (1M: 1 Mol) in einer binären Mischung aus EC:DMC (1:1) zeigt insgesamt die höchste Ionenleitfähigkeit im Temperaturbereich von -20 °C bis +60 °C und übertrifft damit die Leistung der beiden anderen Elektrolytvarianten (Abbildung 3a).

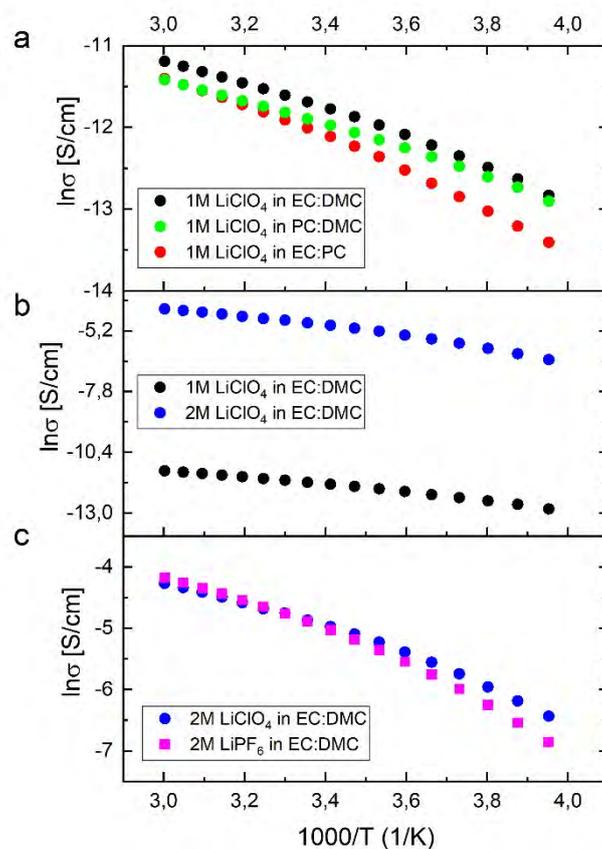


Abbildung 3: Arrhenius-Diagramme der temperaturabhängigen Leitfähigkeiten der getesteten binären Elektrolytmischungen.

a) Vergleich der Elektrolyte mit 1M LiClO₄.

b) Vergleich verschiedener Konzentrationen an LiClO₄ in EC:DMC.

c) Vergleich von 2M LiClO₄ (eigene Messung) mit 2M LiPF₆ (Daten aus [10]) in EC:DMC.

Bild: Maik Eichelbaum

Ein Vergleich der temperaturabhängigen Leitfähigkeit zwischen zwei verschiedenen Konzentrationen von LiClO₄ in EC:DMC ist in Abbildung 3b dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass 2M LiClO₄ in EC:DMC eine höhere ionische Leitfähigkeit aufweist als 1M LiClO₄ in EC:DMC. Mit zunehmender Konzentration von Lithiumsalz-Ionen steigt die Anzahl der Ladungsträger und damit auch die Leitfähigkeit des Elektrolyten.

Ein Arrhenius-Diagramm, das die temperaturabhängige Leitfähigkeit von 2M LiClO₄ und 2M LiPF₆ in EC:DMC (1:1) vergleicht, ist in Abbildung 3c dargestellt. Die Daten für 2M LiPF₆ in EC:DMC wurden der Referenz [10] entnommen. Die Ergebnisse zeigen, dass beide Elektrolyte vergleichbare Ionenleitfähigkeitswerte bei hohen Temperaturen aufweisen. Bei niedrigeren Temperaturen hat 2M LiClO₄ in EC:DMC eine etwas höhere Ionenleitfähigkeit. Dieser Vergleich zeigt, dass zumindest in punkto Elektrolytleitfähigkeit die beiden Salze vergleichbar sind.

4.3 Ermittlung des elektrochemischen Stabilitätsfensters

Das elektrochemische Stabilitätsfenster wurde für alle hergestellten Elektrolyte durch Aufzeichnung von Cyclovoltammogrammen zwischen -3,0 V und +3,0 V ermittelt. Die Ergebnisse für die binären Gemische EC:DMC und EC:PC sowie für die reinen Carbonate DMC und PC sind in Abbildung 4 dargestellt.

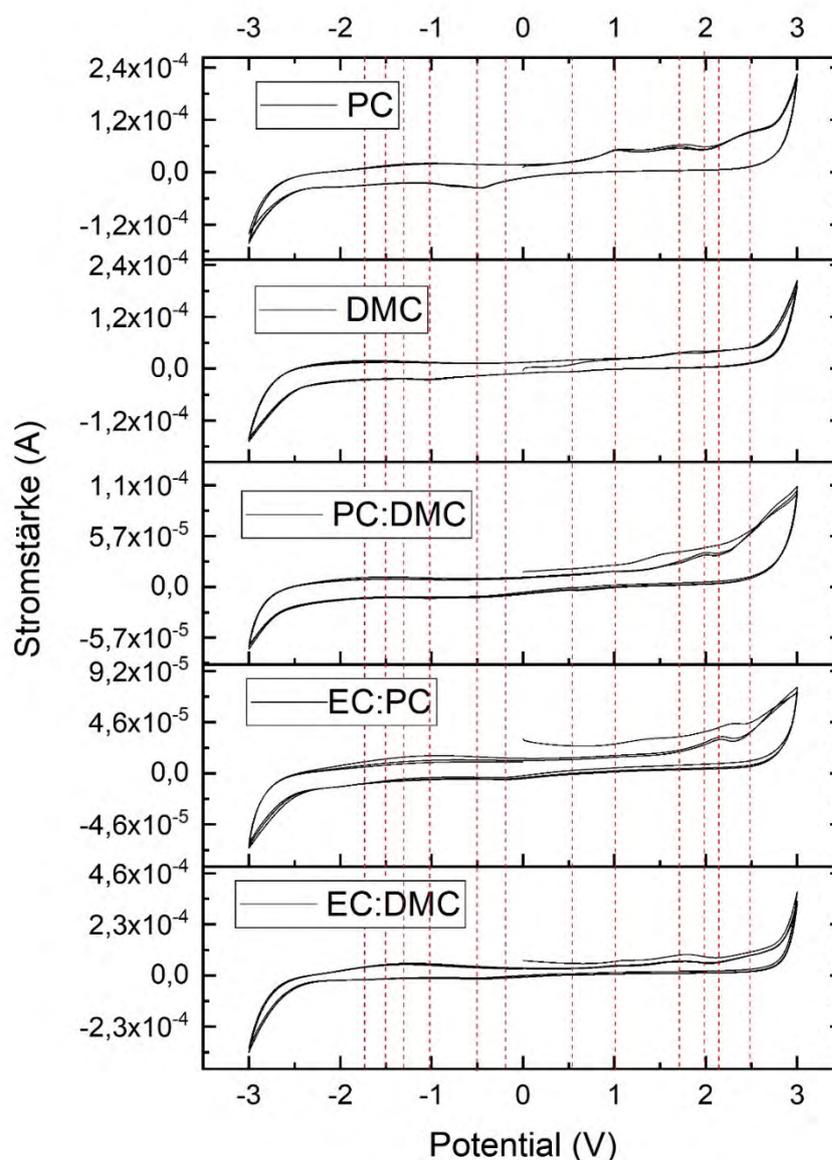


Abbildung 4: Cyclovoltammogramme binärer und reiner Carbonate, jeweils versetzt mit 1M LiClO₄. Die roten gestrichelten Linien markieren charakteristische Peaks in den einzelnen Cyclovoltammogrammen.
Bild: Maik Eichelbaum

Den Cyclovoltammogrammen kann entnommen werden, dass im Potentialfenster zwischen $-2,5\text{ V}$ und $+2,5\text{ V}$ nur geringe Stromstärken gemessen werden. Innerhalb dieses Bereiches können die Elektrolytgemische demzufolge als stabil betrachtet werden. Erst außerhalb dieses Fensters steigen die Ströme exponentiell an. Innerhalb dieses Stabilitätsfensters sind jedoch Peaks erkennbar, die auf irreversible Redoxreaktionen hindeuten. Zum einen könnten Wasser- oder Sauerstoffspuren diese Peaks verursachen. Wasser beziehungsweise OH^- zeigt typischerweise einen Oxidationspeak im Bereich von $+0,5\text{ V}$. Genau bei diesem Potential ist allerdings kein eindeutiger Peak in den gemessenen Cyclovoltammogrammen identifizierbar.

Sauerstoff zeigt typischerweise einen Reduktionspeak zwischen $-0,5\text{ V}$ und $-1,1\text{ V}$. Die Elektrolytlösungen EC:DMC, PC:DMC und PC zeigen bei etwa $-0,5\text{ V}$ einen kathodischen Peak, DMC bei etwa $-0,9\text{ V}$. Hier könnte es sich demzufolge um eine Reduktion von Sauerstoffspuren handeln.

Die übrigen Peaks könnten durch weitere unbekanntere Verunreinigungen oder durch Reaktionen der Elektrolyte verursacht sein. Auffällig ist, dass ein anodischer Peak beziehungsweise eine Schulter bei etwa $+2,5\text{ V}$ sowohl im reinen PC als auch in den PC-haltigen Gemischen (PC:DMC und EC:PC) sichtbar ist. Es könnte sich demzufolge um eine spezifische Zersetzung oder Verunreinigung von PC handeln. Hier sind jedoch weitere analytische Methoden notwendig, um die genauen Ursachen dieses Signals und der weiteren Peaks aufzuklären.

4.4 Thermische Alterung

Die binären Elektrolytlösungen wurden einzeln in der TSC 1600 GC Testzelle bei $+60\text{ °C}$ für die Dauer von einer, drei und fünf Stunden erhitzt. Im Anschluss an den thermischen Alterungsprozess wurden jeweils Cyclovoltammetrie-Messungen an den gealterten Elektrolyten durchgeführt. Die daraus resultierenden Daten sind in Abbildung 5 dargestellt. Nach der thermischen Alterung der Elektrolyte sind deutliche Veränderungen in den Cyclovoltammogrammen zu beobachten. Bei allen Elektrolyten verschiebt sich mit der thermischen Behandlung die kathodische Grenze des Stabilitätsfensters zu geringeren negativen Potentialen. Die anodische Grenze verschiebt sich dagegen unterschiedlich. Bei PC:DMC ist eine Verschiebung zu geringeren Potentialen, bei EC:PC zu leicht höheren Potentialen zu beobachten.

Für EC:DMC ist keine eindeutige Veränderung registrierbar.

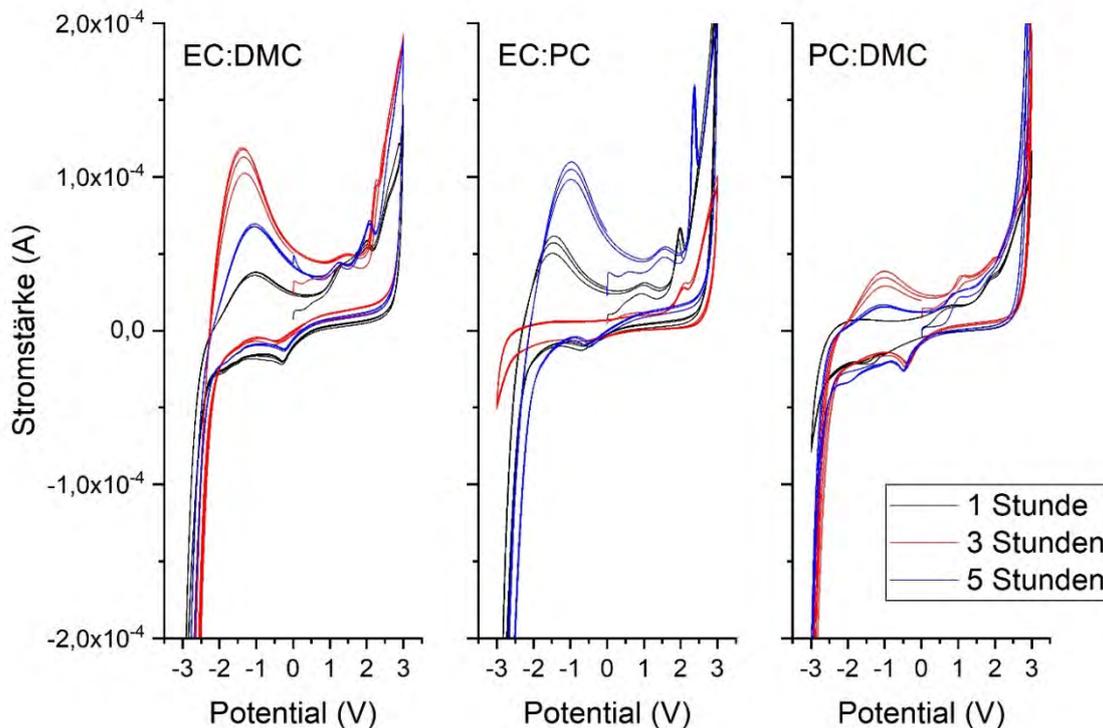


Abbildung 5: Cyclovoltammogramme binärer Carbonatgemische, jeweils versetzt mit 1M LiClO₄ nach thermischer Alterung bei +60°C zwischen einer und fünf Stunden. Bild: Maik Eichelbaum

Grundsätzlich ist bei allen Elektrolytlösungen eine Erhöhung des Stroms beim anodischen Peak bei etwa -1 V bis -1,5 V erkennbar. Darüber hinaus ist eine signifikante Verschiebung dieses Peaks sichtbar. Allerdings sind die zeitlichen Trends uneinheitlich, das heißt, das Maximum des Peaks wird bei drei Stunden (EC:DMC und PC:DMC) oder bei fünf Stunden (EC:PC) erreicht. Auffällig ist, dass in den EC-haltigen Mischungen nach Erhitzen ein anodischer Peak bei etwa +2,0 V (EC:DMC nach fünf Stunden, EC:PC nach drei Stunden) entsteht. In der EC:PC-Mischung ist dieser Peak nach fünf Stunden nahezu verschwunden, stattdessen wird ein signifikanter Peak bei etwa +2,5 V beobachtet. Die PC:DMC-Mischung verhält sich deutlich anders. Hier entsteht durch die thermische Behandlung ein kathodischer Peak bei -0,5 V.

Die Ergebnisse dieses thermischen Alterungstests bestätigen damit eindeutig, dass erhöhte Temperaturen von bereits +60°C einen erheblichen Einfluss auf die elektrochemische Stabilität von Elektrolyten haben, was zu einer verstärkten Elektrolytzersetzung über längere Heizperioden führt. Dies wiederum kann die Lebensdauer der Batterien erheblich verkürzen.

4.5 Elektrochemische Alterung

Als weiterer Alterungstest wurden die binären Elektrolytlösungen bei 0 V, +3,0 V beziehungsweise bei -3,0 V für 30 Minuten in der TSC-1600-GC Testzelle behandelt, um eine elektrochemische Alterung hervorzurufen. Anschließend wurden wiederum zur Charakterisierung Cyclovoltammogramme aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6 zusammengefasst. Die größten Änderungen sind, wie erwartet, jeweils bei Behandlung an den Grenzen des Stabilitätsfensters, das heißt, bei +3,0 V und -3,0 V erkennbar, während bei 0 V keine signifikanten Veränderungen sichtbar sind. Die Alterung bei -3,0 V verursacht bei den DMC-haltigen Elektrolytlösungen eine Verschiebung der kathodischen Grenze des Stabilitätsfensters zu kleineren negativen Spannungen. Zudem ist eine deutliche Verschiebung aller Cyclovoltammogramme zu positiven Stromstärken zu vermerken. Auffällig ist zudem ein neuer anodischer Peak bei +2,5 V für die EC:DMC-Mischung. In allen Mischungen entsteht außerdem ein sehr breiter anodischer Peak im Bereich -1 V bis -2 V. Die Behandlung bei +3,0 V verursacht ebenfalls eine Verschiebung der kathodischen Grenze des Stabilitätsfensters zu niedrigeren negativen Spannungen. An der anodischen Grenze kann dagegen für die DMC-haltigen Mischungen eine Verschiebung zu höheren Spannungen beobachtet werden. Für alle Mischungen ist das Entstehen neuer kathodischer Peaks zwischen -1 V und -2 V auffällig. Zudem entstehen auch neue anodische Doppelpeaks bei etwa +1 V beziehungsweise +2 V. Ähnlich der Alterung bei -3,0 V entsteht auch zusätzlich noch ein anodischer Peak im Bereich zwischen -1 V und -2 V in allen Mischungen. Dieser Peak ähnelt interessanterweise dem durch die thermische Alterung verursachten Peak in diesem Potentialbereich hinsichtlich Lage und Breite.

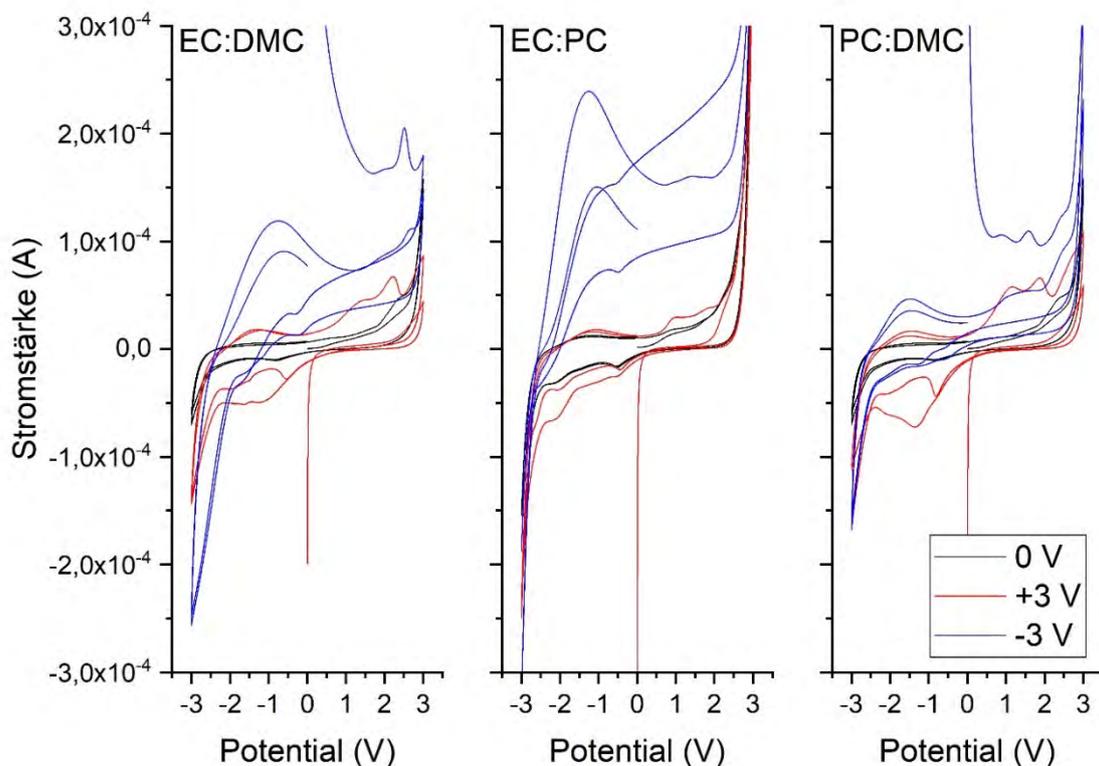


Abbildung 6: Cyclovoltammogramme binärer Carbonatgemische, jeweils versetzt mit 1M LiClO₄, nach elektrochemischer Alterung bei den Potentialen 0 V, +3 V bzw. -3 V für jeweils 30 Minuten. Bild: Maik Eichelbaum

4.6 Fazit

Ziel dieses Projektes war es, einen neuen Messstand zur Charakterisierung und Alterung von Batterieelektrolyten aufzubauen, in Betrieb zu nehmen und erste Modellelektrolyten hinsichtlich ihrer elektrischen und elektrochemischen Eigenschaften sowie ihrer thermischen und elektrochemischen Stabilität zu untersuchen. Es zeigte sich, dass sich die wichtigen Parameter Leitfähigkeit und das elektrochemische Stabilitätsfenster der Elektrolyte sehr gut mit diesem Aufbau untersuchen lassen. Die thermische und elektrochemische Alterung konnte ebenfalls in dieser Messzelle durchgeführt werden.

Die erhaltenen Cyclovoltammogramme erweisen sich jedoch als sehr komplex. Ein genaueres Verständnis der Alterungsprozesse erfordert die Anwendung weiterer analytischer Methoden wie Kernspinresonanzspektroskopie, Ionenchromatographie und Infrarotspektroskopie. Der Einfluss von Wasser und Luft auf die Cyclovoltammogramme soll zudem ausführlicher analysiert werden. In einem nächsten Schritt wird der Vergleich mit real in Batteriezellen gealterten Elektrolytlösungen erfolgen. Außerdem soll der Einfluss frischer und künstlich in der Messzelle gealterter Elektrolyte auf die Leistungsfähigkeit von Lithiumionen-Batterien untersucht werden.

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die Untersuchung von Batterien zur Aufklärung von Schadensfällen sowie zur Vorhersage und Verlängerung der Lebensdauer stellt besondere Anforderungen an die Analytik. Diese Messungen erfordern einen hohen Innovationsbedarf in der Automobilindustrie, die bisher mit entsprechenden elektrochemischen Systemen wenig Erfahrungen hat. Auf diesem Feld besteht daher ein erheblicher Kooperationsbedarf mit elektrochemischen Laboren in Hochschulen und Forschungseinrichtungen. Das hier vorgestellte Forschungsprojekt läuft deshalb komplementär zur Untersuchung vollständiger Batteriemodule in Testständen am Campus Future Driveline und legt somit den Grundstein für den Aufbau von Kompetenzen in der Analytik von Batteriezellen und -komponenten an der Ohm, um zukünftig entsprechende Auftragsforschungs- und Dienstleistungsprojekte durchführen zu können.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse dieses Vorhabens wurden beziehungsweise werden bereits im Rahmen zweier Abschlussarbeiten verwertet:

Art	Titel	Autor	Status
Masterarbeit	Analysis of aging processes in lithium-ion battery electrolytes for commercial vehicle applications	Syaleen Fairuzza Binti Sharuddin	abgeschlossen
Bachelorarbeit	Analytik von Alterungsprozessen in Lithiumbatterie-Elektrolyten	Valeria Roempler Dellien	laufend

Auf Grundlage der Vorarbeiten ist ein Förderantrag zur Durchführung anspruchsvoller Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Batterieelektrolyt-Alterung geplant. Ziel ist es, Projektmittel zum Transfer der grundlegenden Erkenntnisse aus der Vorlaufforschung zur Entwicklung neuer Elektrolytadditive und Elektrolytsysteme sowie analytischer Methoden für den Einsatz in Batterie- und/oder Brennstoffzellen-elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen einzuwerben.

Auf der Basis des neuen Batteriemessstandes wird zudem ein Praktikumsversuch für das Lehrmodul „Klima-, Energie- und Rohstoffwandel“ im Masterstudiengang Angewandte Chemie entwickelt.

6 Literatur

- [1] A. Yoshino, The Birth of the Lithium-Ion Battery, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2012**, *51*, 5798 – 5800.
- [2] S. Pardhi, S. Chakraborty, D.-D. Tran, M. El Baghdadi, S. Wilkins, O. Hegazy, A Review of Fuel Cell Power trains for Long-Haul Heavy-Duty Vehicles: Technology, Hydrogen, Energy and Thermal Management Solutions, *Energies* **2022**, *15*, 9557.
- [3] J. B. Goodenough, K.-S. Park, The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective, *J. Am. Chem. Soc.* 2013, *135*, 1167–1176.
- [4] L. Mauler, F. Duffner, W. G. Zeier, J. Leker, Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050, *Energy Environ. Sci.* **2021**, *14*, 4712-4739.
- [5] B. L. D. Rinkel, D. S. Hall, I. Temprano, C. P. Grey, Electrolyte Oxidation Pathways in Lithium-Ion Batteries, *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 15058–15074.
- [6] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, D. Riu, A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications, *J. Power Sources* **2013**, *241*, 680-689.
- [7] J. Henschel et al., Lithium-Ion battery electrolyte degradation of field-tested electric vehicle battery cells – A comprehensive analytical study, *J. Power Sources* **2020**, *447*, 227370.
- [8] C. Essl, L. Seifert, M. Rabe, A. Fuchs, Early Detection of Failing Automotive Batteries Using Gas Sensors, *Batteries* **2021**, *7*, 25.
- [9] X. Tian, Y. Y. B. Fang, P. Yang, T. Wang, P. Liu, L. Qu, M. Li, S. Zhang, Design Strategies of Safe Electrolytes for Preventing Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries, *Chem. Mater.* **2020**, *32*, 9821–9848.
- [10] D. M. Drüschler, D. B. Huber, Application note: Determination of the temperature dependent conductivity of a lithium-ion battery electrolyte by means of EIS, rhd instruments GmbH & Co. KG, Otto-Hesse-Straße 19 / T3, 64293 Darmstadt, 2020.

Maßgeschneiderte organische Halbleiter für flexible Low-cost-Infrarotdetektoren auf der Basis computergestützter Modellierung (INFRACost)

Prof. Dr. Markus Hummert

Fakultät Angewandte Chemie/OHM-CMP
Labor für molekulare Funktionsmaterialien

Zusammenfassung:

In Zeiten der Digitalisierung und Vernetzung werden integrierte optische Sensoren immer wichtiger. Seit Kurzem gibt es auch Organische Photodetektoren (OPD), die aus leitfähigen organischen Molekülen bestehen und in nm-dünnen Schichten aufgebracht werden. Eine aktuelle Herausforderung ist die noch zu geringe Leistungsfähigkeit, die mit dem derzeitigen Mangel an geeigneten Substanzen zusammenhängt.

Ziel des interdisziplinären Projektes ist es, auf OPD zugeschnittene Substanzen herzustellen, die zu einer signifikanten Leistungssteigerung führen. Der Entwicklungsprozess unterscheidet sich durch digitale Komponenten von rein empirischen Vorgehensweisen. Im Gegensatz zu anorganischen Systemen werden auf diese Weise leichte flexible Sensoren ressourcenschonend produzierbar, um neue Anwendungen zu eröffnen.

1 Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Angewandte Chemie/Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP) Labor für molekulare Funktionsmaterialien
Projektleitung	Prof. Dr. Markus Hummert
Projektteam	Fabian Lerch (B. Sc.), Andreas Müller, Theresa Kolb
Kontakt Daten Projektleitung	markus.hummert@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

In Zeiten der Digitalisierung und Vernetzung wurden Miniaturisierung und Integrierbarkeit von Sensoren zu Kernaspekten ihrer Funktionalität. Dazu gehören insbesondere Photosensoren, die oft auch als Photodetektoren (PD) bezeichnet werden. Ähnlich wie Solarzellen wandeln sie eingehende optische Signale (Licht) in elektrische Signale um, die weiter analysiert werden können. Die derzeitigen Anwendungsfelder sind vielfältig und entwickeln sich kontinuierlich weiter. Die gegenwärtig eingesetzte Technik basiert auf kristallinen anorganischen Halbleitern wie Silizium (Si) oder Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs). Diese Halbleiter werden generell in sehr aufwändigen und energieintensiven Verfahren hergestellt.

Anorganische PD decken üblicherweise einen sehr breiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums ab. Um bestimmte Wellenlängenbereiche des Lichts (also Farben) detektieren zu können, müssen Breitband-Detektoren zusätzlich mit optischen Filtern versehen werden, die jedoch Verluste und geringe Farbselektivität verursachen. Eine leistungsfähigere Alternative setzt auf eine komplexe Kombination von PD mit optischen Monochromatoren (Beugungsgitter, Prismen), welche die Geräte sehr groß und teuer werden lassen. Die Systeme reagieren empfindlich auf Veränderungen der Umgebung (zum Beispiel Temperatur, Vibrationen), was die Anwendung auf stationäre Umgebungen beschränkt. Außerdem sind die anorganischen PD aufgrund ihrer kristallinen Struktur sehr schwer, spröde und unflexibel. Moderne Anwendungen hingegen erfordern leichte und flexible PD, um innovative Produkte realisieren zu können.

In den letzten Jahren haben organische Halbleiter als Alternative viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Das mit Abstand am stärksten vermarktete organische Elektronikbauteil, die **Organische Lichtemittierende Diode** (OLED), hat sich aufgrund ihrer Sparsamkeit und der brillanten Farbwiedergabe mittlerweile fest im Display-Markt etabliert. Gegenwärtig noch in der Kommerzialisierungsphase ist die Organische Photovoltaik (OPV). Der Aufbau und die Funktion von Solarzellen gleichen dabei in vieler Hinsicht den Photodetektoren.

„Organisch“ ist in diesem Zusammenhang bezüglich der chemischen Struktur des Halbleiters zu verstehen. Die nur Nanometer-dicken Schichten bestehen aus einer Vielzahl von kohlenstoffhaltigen Molekülen, deren chemische Strukturen auf molekularer Ebene chemisch modifiziert werden können. Die Variationsvielfalt eingesetzter Molekülbausteine erlaubt es durch die chemische Synthese, Materialien herzustellen, die maßgeschneiderte Eigenschaften aufweisen. Die molekularen Eigenschaften müssen

in ihrer Gesamtheit exakt aufeinander abgestimmt sein, um die (optimale) Funktion des optoelektronischen Bauelements zu gewährleisten. Im Gegensatz zu kristallinen Halbleitern gehören die organischen Halbleiter aufgrund schwacher Bindungen zwischen den Molekülen zur „weichen Materie“.

Überträgt man das Konzept der organischen Halbleiter auf die Sensorik, eröffnen **Organische Photodetektoren (OPD)** vollkommen neue Möglichkeiten. OPD haben das Potenzial, innovative Produkte mit herausragenden Eigenschaften zu ermöglichen:

- geringes Gewicht
- großflächige Detektion
- einfache Messung bestimmter Farben
- Semi-Transparenz

Außerdem lassen sich OPD aufgrund ihrer einfachen Architektur auch auf flexiblen Materialien (Textilien, Papier, Folie) kostengünstig und ressourcenschonend herstellen. Die organische Sensorik bietet aktuell das Potenzial – beispielsweise Nahinfrarotdetektoren – klein, leicht und kostengünstig herstellbar werden zu lassen, was Medizin- und Agrartechnik vollständig verändern könnte.

Eine Anwendung ist die berührungslose Messung der Reflexionsspektren beliebiger Objekte. In vielen Bereichen können Spektrometer in Form von Schmalband-OPD mit abstimmbarer Wellenlänge für die Materialanalyse eingesetzt werden. OPD-Spektrometer sind in der Lage, den Reifegrad von Landwirtschaftserzeugnissen abzuschätzen (z. B. in Abdeckfolien), die Qualität von Lebensmitteln zu erfassen (z. B. Fett-/Zuckergehalt), schädliche Stoffe sofort zu identifizieren (z. B. Drogen in Getränken), oder Produktionsprozesse laufend zu überwachen (z. B. Feuchtigkeit von Wellpappe). Die charakteristischen Reflexionsmerkmale können mit einem entsprechenden OPD-Array dazu herangezogen werden, zwischen verschiedenen Materialien zu unterscheiden (z. B. verschiedene Natur- oder Kunstfasern) oder Konsum-/Industrieprodukte zu authentifizieren (z. B. Markenfälschungen).

3 Ziele des Forschungsprojekts

Aufbauend auf der OPV und den darin eingesetzten organischen Materialien haben jüngste Forschungsarbeiten zu einer raschen Verbesserung der OPDs geführt. Allerdings gibt es noch einige wichtige Forschungsaufgaben im Bereich organischer Photodetektoren. Unter anderem ist für die Realisierung noch leistungsfähigerer OPD eine weitere Entwicklung der eingesetzten Moleküle notwendig. Für viele der genannten Anwendungen gibt es derzeit keine geeigneten Materialkandidaten.

Offensichtlich sind also neue organische Materialien der Schlüssel, um das Potential von OPD voll auszuschöpfen zu können. Insbesondere besteht ein großer Bedarf an Materialien, die eine Signalerkennung im infraroten Spektralbereich bis 2.000 nm ermöglichen. Ziel dieses Projektes war es, neue Materialien zu identifizieren und herzustellen, die speziell auf die Erfordernisse dieses Bauelementes zugeschnitten sind.

Die Evaluation der synthetisierten Materialien (Zielstrukturen) in OPD erfolgt am „Dresden Integrated Center for Applied Physics and Photonic Materials (IAPP)“ an der TU Dresden. Dabei sollen die Materialien in optischen Detektoren eingesetzt werden, indem nacheinander Dünnschichten mittels Vakuum-Verdampfung abgeschieden werden. Die grundlegenden Leistungskennzahlen der entstandenen Bauelemente werden sorgfältig bestimmt und erlauben eine valide Bewertung der OPD, sowie der darin wirkenden Substanzen.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

In diesem Projekt wurde erstmalig eine an Hochschulen unübliche Strategie verfolgt, die der industriellen Methodik der Materialentwicklung gleicht. Dabei wurden alle im Projekt geplanten Moleküle (Zielstrukturen) konsequent vorab am Computer modelliert. Durch die theoretischen Rechnungen können aus der räumlichen Molekülstruktur alle Eigenschaften vorhergesagt werden. Durch die relativ schnelle Modellierung erlangt man auf elegante Weise Kenntnis darüber, ob die Zielmoleküle den Kriterien entsprechen, bevor mit der aufwendigen Herstellung im Chemielabor begonnen wird. Durch Eingrenzung auf wenige Zielstrukturen kann die zeitlich begrenzte Projektperiode deutlich fokussierter und effektiver für die anschließende Synthese genutzt werden.

Das Projekt wurde mit quantenmechanischen Modellierungen einiger Molekülstrukturen begonnen, deren Eigenschaften basierend auf der Dichte-Funktionaltheorie berechnet wurden. Alle Berechnungen wurden mit dem Programm TURBOMOLE unter Verwendung des CAM-B3LYP-Hybridfunktional und einem Triple-Zeta-Basissatz durchgeführt (def2-TZVP).

Um die wechselseitige Polarisierung des Moleküls zu simulieren, das in eine organischen Halbleiterschicht eingebettet ist, wurde ein Modell für Lösemittelleffekte hinzugefügt (COSMO-Modell, $\epsilon = 4$). Für die Simulationen stand eine darauf zugeschnittene Workstation (AMD Ryzen Threadripper PRO 5965WX, 24 Cores, 48 Threads, 4,5 GHz, 64 GB RAM) zur Verfügung.

Aufbauend auf einer bereits eingesetzten Referenzsubstanz wurden 79 strukturelle Derivate hiervon modelliert. Die durch Molecular Modeling erhaltenen physikalisch relevanten Parameter wurden mit den Resultaten der Referenzsubstanz verglichen. Um auch eine Leistungserhöhung im Detektor erreichen zu können, waren für die Synthese nur Moleküle interessant, die bessere Eigenschaften aufwiesen als die Referenzsubstanz.

Die Materialien werden im OPD in der Elektronentransportschicht eingesetzt und gewährleisten dort den Ladungstransport zu den Elektroden. Die potenziellen Transportmaterialien müssen auf die Anforderungen eines OPD gut abgestimmt sein. Hinsichtlich dieser Funktion sind zwei Kriterien relevant. Das wichtigste physikalische Ausschlusskriterium ist die Elektronenaffinität der Zielmoleküle. Diese mussten mindestens den Wert der Referenzsubstanz erreichen oder besser eine höhere Elektronenaffinität aufweisen.

Das zweite Ausschlusskriterium bezieht sich auf die Farbigkeit der Substanzen. Damit möglichst viel Licht im dafür vorgesehenen Bereich des OPD absorbiert wird, sollte das Transportmaterial dafür idealerweise transparent sein. Die damit verbundene Größe wird als optische Bandlücke bezeichnet. Nur Materialien, die kein Licht im sichtbaren Bereich absorbieren, wurden für die Synthese ausgewählt. Nach Ansetzen dieser Auswahlkriterien basierend auf der Modellierungen wurde ungefähr die Hälfte der Zielstrukturen verworfen.

Die Anwendungstests synthetisierter Materialien werden in enger Kooperation am IAPP durch Vakuumverdampfung durchgeführt. Dabei werden die hergestellten Substanzen in Verdampfungsanlagen eingebracht, um daraus dünne Schichten durch Gasphasenabscheidung herzustellen. Die Anwendung in Sensoren setzt demzufolge eine hinreichende Volatilität im Vakuum voraus. Zielstrukturen, deren Molekülstruktur in der Simulation sehr ausgedehnte planare Bereiche zeigten, wurden ebenfalls nicht für die Synthese berücksichtigt. Bei diesen Strukturen war zu erwarten, dass wegen einer hohen Kristallinität ein Verdampfen unter 400 °C im Vakuum nicht möglich ist.

Eine weitere Eingrenzung erfolgte auf der Basis synthetisch präparativer Gesichtspunkte. Dazu wurde die Verfügbarkeit der zur Realisierung der Zielstruktur notwendigen Synthesebausteine bewertet. Viele Bausteine waren kommerziell zu erschwinglichen Preisen erhältlich und konnten direkt zur Herstellung

eines halbleitenden Materials eingesetzt werden. Andere mussten, ausgehend von kostengünstigeren Startmaterialien eigens für dieses Projekt chemisch zu einem reaktionsfähigen Intermediat umgesetzt werden. Insgesamt wurden 32 Zielstrukturen für die Halbleiter-Synthese ausgewählt und die erforderlichen Bausteine entweder eingekauft oder synthetisiert.

Die Herstellung ausgewählter Zielstrukturen im Chemielabor gestaltete sich teilweise in mehrstufigen organischen Synthesen. Die vorhandenen, gekauften, beziehungsweise selbst synthetisierten, Synthesebausteine wurden dann chemisch mit einem weiteren Molekülbaustein verknüpft und anschließend nasschemisch gereinigt. Nach dem Trocknen wurden einige Elektronentransportmaterialien zur Sublimation an das IAPP übergeben. Die Synthesen sind zurzeit noch nicht abgeschlossen, und es wird noch einige Wochen in Anspruch nehmen, bis die Liste von interessanten Materialkandidaten abgearbeitet sein wird.

Die Anwendungstests synthetisierter Materialien werden durch Vakuumverdampfung durchgeführt. Bevor organische Halbleitermaterialien zur Herstellung der optoelektronischen Bauelemente eingesetzt werden, müssen diese für den Einsatz vorbereitet werden und eine Reinigung durch Sublimation durchlaufen. In diesem Schritt zeigt sich die thermische Stabilität der Substanz, also ob sich die Moleküle unzersetzt verdampfen lassen. Zudem offenbart sich, ob das Material eine hinreichende Volatilität besitzt. Diese Eigenschaften sind durch Simulationen nicht vorhersehbar und müssen empirisch bestimmt werden. Bis auf eine wurden bisher alle an das IAPP gelieferten Substanzen erfolgreich sublimiert. Weitere Substanzen sind derzeit in Vorbereitung und werden das Chemielabor bald in Richtung Dresden verlassen. Nach der Reinigung durch Sublimation werden die Substanzen dann in verschiedenen Test-Bauelementen appliziert.

Um den direkten Austausch zwischen Entwicklern (Chemiker) und Anwendern der Substanzen (Physiker, Prozessingenieure) zu fördern, sowie die Anwenderperspektive kennenzulernen, wurde das Projektteam nach Dresden eingeladen. Der Aufenthalt am IAPP wurde genutzt, ein erstes Feedback über die Leistungsfähigkeit der Materialien zu erhalten.

Die regelmäßige Rückkopplung mit dem Anwender der Materialien ist ein wichtiger Faktor für den Erfolg des Projektes. Ergebnisse der in photonischen Bauelementen durchgeführten Materialtests sind zurzeit noch nicht vorhanden und werden erst in den kommenden Wochen erwartet. Eher langfristig wird mit den Materialien Grundlagenforschung zur Physik der Bauelemente erfolgen, die einige wissenschaftlichen Überraschungen beinhalten können.

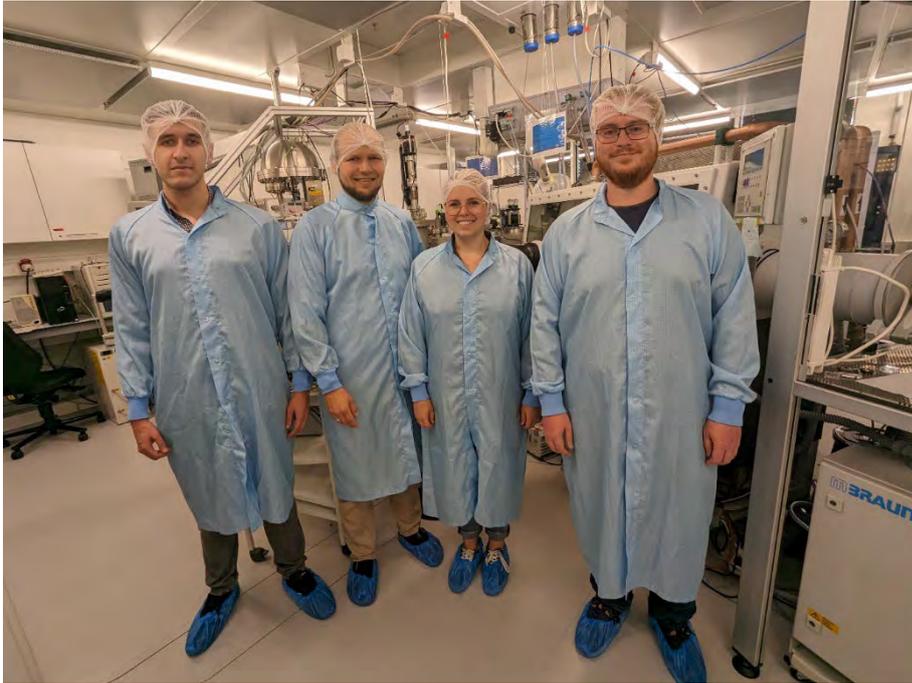


Abbildung 1: Die Projektmitarbeitenden Andreas Müller (1. v.l.), Theresa Kolb (2. v.r.) und Fabian Lerch (1. v.r.), zusammen mit dem Gruppenleiter des IAPP, Dr. Johannes Benduhn (2. v.l.) im Reinraum des IAPP. Bild: Markus Hummert.



Abbildung 2: Bei der Reinraumbesichtigung des IAPP nutzten die Projektmitarbeitenden die Gelegenheit, in das Innere einer Aufdampfanlage zu blicken. Mithilfe einer solchen Apparatur werden Organische Photodetektoren hergestellt, die von den Projektmitarbeitenden synthetisierte Materialien enthalten. Bild: Markus Hummert.

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Mit Realisierung der geplanten Arbeiten wurde das Forschungsprofil der Ohm um eine weitere aufstrebende Technologie erweitert. Die hergestellten Materialien werden in den kommenden Wochen und Monaten vom Anwender getestet. Da mithilfe neuer Substanzen und Verfahren einer Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik zu erwarten ist, scheint die Verwertung der Ergebnisse in Form von Patenten und Veröffentlichungen sehr realistisch.

Das IAPP bildet das Zentrum eines Technologie-Clusters, in dem alle nötigen Kompetenzen zu photonischen Technologien, organischen Halbleitern und elektronischen Bauelementen gebündelt sind. Aus dem Institut wurden mehrere erfolgreiche Start-ups ausgegründet (Novaled GmbH, Heliatek GmbH). Hier wurde auch der Grundstein für den heutigen wirtschaftlichen Erfolg der OLED-Technologie gelegt. Durch enge Kontakte zu diesen in Deutschland ansässigen Kooperationspartnern und Unternehmen kann der Wissens- und Technologietransfer gewährleistet werden.

Eine der jüngsten Ausgründung des IAPP, die Senorics GmbH, beschäftigt sich derzeit mit der Kommerzialisierung der OPD und bietet sich für anschließende Kooperationsprojekte an. Die Firma Senorics plant derzeit die erste Produktionsserie eines Spektrometer-Chips auf der Basis organischer Halbleiter. Eines der darin enthaltenen organischen Materialien wird vom „Labor für molekulare Funktionsmaterialien“ an der Ohm im größeren Maßstab für die Chip-Produktion synthetisiert werden. Ein weiteres Forschungsprojekt zu einem anderen organischen Halbleiter befindet sich in der Planungsphase.

Auch lokale Kooperationspartner für vorgesehene Anschlussprojekte können bei der Einwerbung von Drittmitteln einbezogen werden. Die Siemens Healthineers AG ist im Gesundheitswesen aktiv und Hersteller von Medizintechnikprodukten, in denen OPD eingesetzt werden könnten (zum Beispiel Röntgensysteme, Produkte zur Diagnostik). Am Energie Campus Nürnberg (EnCN) wird anwendungsbezogen im OPV-Bereich geforscht. Die im dortigen Druckkompetenzzentrum entwickelten Prozesse zur Herstellung halbleitender Schichten sind komplementär zu Verdampfungsverfahren und attraktiv für die Produktion von OPD. Beide Stellen haben ein Interesse an der Weiterentwicklung der organischen Elektronik und sind potenzielle Partner für Verbundprojekte.

Zur Anschlussfinanzierung sind Grundlagenprojekte bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) möglich, die die Förderung an HAWs konsequent ausbaut. Diese Projekte fördern erkenntnisgeleitete Wissenschaft und dienen der forschungsstrukturellen Profilierung im Bereich des Erkenntnistransfers. Parallel sind anwendungsorientierte Projekte in den Förderprogrammen „KMU-innovativ“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und ZIM des Bundesministeriums für Wirtschaft möglich. KMU-Innovativ unterstützt Maßnahmen in passgenauen Bereichen (ProMat_KMU, Elektronik, Photonik, Ressourceneffizienz). Die genannten Fördermaßnahmen sind Projekte mit einer Laufzeit von mehreren Jahren mit einem Volumen von bis zu 300.000 Euro. Nach Evaluation aller Forschungsergebnisse, insbesondere die Anwendungstests, wird beabsichtigt, mit den obengenannten Interessenten Drittmittel für die Weiterentwicklung zu beantragen.

6 Literatur

- Wöhrle, D.; Hild, O. R. „Organische Solarzellen. Energie der Zukunft.“ *Chem. Unserer Zeit* 2010, 44 (3), 174–189. DOI: 10.1002/ciuz.201000516.
- Wang, Y.; Kublitski, J.; Xing, S.; Dollinger, F.; Spoltore, D.; Benduhn, J.; Leo, K. “Narrowband organic photodetectors - towards miniaturized, spectroscopic sensing.” *Materials horizons* 2022, 9 (1), 220–251. DOI: 10.1039/d1mh01215k.
- Yanai, T.; Tew, D. P.; Handy, N.C. “A new hybrid exchange–correlation functional using the Coulomb-attenuating method (CAM-B3LYP)” *Chem. Phys. Lett.* 2004, 393 (1), 51–57. DOI: 10.1016/j.cplett.2004.06.011.
- Klamt, A. “Conductor-like Screening Model for real solvents: A new approach to the quantitative calculation of solvation phenomena” *Journal of Physical Chemistry* 1995, 99 (7), 2224–2235. DOI: 10.1021/j100007a062.
- Weigend, F.; Ahlrichs, R. “Balanced basis sets of split valence, triple zeta valence and quadruple zeta valence quality for H to Rn: Design and assessment of accuracy” *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2005, 7, 3297. DOI: 10.1039/B508541A.

Additive Verzahnung

Additive Fertigung von Schneckenverzahnungen zur lastoptimalen Geometrieauslegung

Prof. Dr.-Ing Alexander Monz

Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)

Johannes Gründer, M.Sc.

Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)

Andrea von Lattre-Hertel

Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)

Zusammenfassung:

Das Vorhaben untersucht die grundsätzliche Eignung additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Laufverzahnungen mit verschleißbedingtem Einlauf der Oberflächen – konkret: Schneckenverzahnungen. Forschungsziel ist die Herstellung einer Praxisverzahnung in ausreichend guter Verzahnungsqualität, die Inbetriebnahme eines geeigneten Getriebeprüfstandes sowie die Durchführung von stichpunktartigen Laufversuchen. Zentrales Ergebnis ist eine vergleichende Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit einer additiv gefertigten Laufverzahnung (Stahlschnecke/Kunststoffrad) mit einer klassisch spanend hergestellten Verzahnung (Stahlschnecke/Bronzerad).

Zunächst werden Schneckenräder mit der Verzahnungsgeometrie eines Referenz-Getriebes aus der Praxis mittels verschiedener, am Ohm-CMP zur Verfügung stehenden additiven Fertigungsverfahren aus unterschiedlichen gängigen Materialien hergestellt. Der Einfluss des in der additiven Fertigung üblichen schichtweisen Aufbaus der Schneckenräder auf die Reibung im Zahnkontakt wird für Trockenlauf untersucht. Auf dieser Basis steht eine Methode zur Vorausberechnung der eingebrachten

Reibleistung auf den Zahnflanken zur Verfügung, um darauf aufbauend die Möglichkeit gezielter Mikro-Modifikationen auf den Zahnflanken zur Reduktion der im Betrieb entstehenden Temperatur zu geben.

Das Reibverhalten der zur Verfügung stehenden Werkstoffe aus der additiven Fertigung bei Materialpaarung mit Einsatzstahl wird an einem Scheibe–Stift-Tribometer unter Trockenlauf sowie bei Schmierung mit zwei Schmierfetten aus der Praxis untersucht.

Die Stifte werden für die Versuche additiv hergestellt, die Scheibe besteht aus 16MnCr5. In den Versuchen werden Kraft und Gleitgeschwindigkeit variiert, um zusätzlich eine Abhängigkeit vom Belastungszustand zu ermitteln. Bei den Versuchsergebnissen zeigt sich für alle untersuchten Werkstoffe das günstigste Verhalten bezüglich des Reibkoeffizienten für das Material Nylon12 sowohl im Trockenlauf als auch im geschmierten Zustand. Im Rahmen des Projektes wird ein Schneckengetriebeprüfstand für kleine Achsabstände aufgebaut. Die Belastung an der Abtriebswelle des Schneckenrades erfolgt sinusförmig, angetrieben wird an der Schneckenwelle mit einem Elektromotor durch Vorgabe der Drehzahl. Die Verzahnungen laufen in einem Getriebegehäuse aus der Praxis.

Die bereits vorhandene Schneckenwelle aus 16MnCr5 wird für die Versuche verwendet, die Schneckenräder werden additiv aus Nylon12 hergestellt und in den Versuchen ausgetauscht. Der Reibungszustand wird indirekt über die im Betrieb nahe des Zahneingriffs entstehende Wärme charakterisiert. Die Versuchsdauer für jede Material-, Schmierstoff- und Lastkombination beträgt fünf Stunden. Geringere Beharrungstemperaturen werden als günstigerer Reibungszustand mit geringerer Reibung, höhere Temperaturen als höhere Reibung im Zahnkontakt interpretiert. Die Temperaturen im Getriebe werden im laufenden Betrieb kontinuierlich gemessen. Schließlich wird das Betriebsverhalten mit Schneckenrad aus Bronze mit dem Schneckenrad aus Nylon12 bei verschiedenen Fetten und Betriebszuständen gegenübergestellt.

An einem Schneckenrad aus Nylon12 beim Betrieb im Trockenlauf ist während des Versuchs ein Schaden am Schneckenrad durch Abscheren der Zähne entstanden. Dieser Schaden wird auf die starke Temperaturentwicklung wegen der hohen Reibung im Trockenlauf zurückgeführt.

1 Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Institut für Chemie-, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Alexander Monz
Projektteam	Johannes Gründer, M.Sc. Andrea von Lattre-Hertel
Kontakt Daten Projektleitung	E-Mail: alexander.monz@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Schneckengetriebe finden sich auch heute noch in einer Vielzahl unterschiedlicher Antriebsaufgaben – bevorzugt dort, wo aufgrund von Bauraumanforderungen der Motor nicht koaxial liegen kann. Die internationale Forschung zu dieser Getriebegattung hat dabei zwei Schwerpunkte: Im chinesischen Wirtschaftsraum dominiert die Untersuchung von Herstellung und Auslegung globoidischer Schnecken. Im europäischen Wirtschaftsraum findet die Forschung von Zylinderschnecken fast ausschließlich in Deutschland innerhalb der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA). statt. Fokus der 90er und 2000er Jahre war dort der Aufbau einer Tragfähigkeitsberechnung, seit etwa 2015 liegt der Schwerpunkt auf Werkstoffen und der Optimierung der Verzahnungsgeometrie.

Neben kostenoptimierten Anwendungen in der Großserie (mehr als 500.000 Stück/Jahr durch die beiden Marktführer SEW Eurodrive und Nord Drivesystems) geht die Entwicklungsrichtung bei etwa 30 KMUs, die innerhalb des Projektausschuss Schneckengetriebe der FVA im VDMA organisiert sind, verstärkt hin zu anwendungsoptimalen Kleinserien. Die Verzahnungen werden dabei spanend (Wälzfräsen/Schleifen) hergestellt und die Schnecken in der Regel einsatzgehärtet. Die benötigten Werkzeuge – insbesondere für das globoidische Schneckenrad sind teuer.

Derart in der Formgebung limitiert, weisen Schneckengetriebe eine eingeschränkte Geometrievarianz auf, die in DIN 3975-1 [1] sowie DIN 3975-2 [2] beschrieben ist. Die Auslegung konventioneller Stahl/Bronze-Werkstoffkombinationen erfolgt nach DIN3996 [3], die für Zahnräder aus Kunststoff nicht gültig ist. Zur Auslegung von Schraubrad- beziehungsweise Schneckengetrieben mit Stahlschnecke und Rad aus Thermoplasten gilt die VDI-Richtlinie 2736 Blatt 3 [4]. Diese Richtlinie bezieht sich auf spritzgegossene Schneckenräder.

Jüngere Untersuchungen zum Beispiel von Hasse [5] zeigen, dass gezielte Nachgiebigkeiten lastübertragender Strukturen eine Möglichkeit darstellen, um deutlich höhere Leistungsdichten zu erreichen. Gleichzeitig ist das Einbringen einer angepassten Steifigkeit in der Verzahnung durch die angewandten Fertigungsverfahren sehr eng begrenzt. An dieser Stelle sollen die Möglichkeiten der additiven Fertigung genutzt werden, um die Geometrie gezielt zu modifizieren. Die additive Fertigung von geometrisch komplexen Bauteilen hat den Prototypenstand inzwischen verlassen. Gebhardt [6] beschreibt sowohl im Kunststoff- als auch im Metallbereich erste industrielle (Klein-) Serienanwendungen. Träger [7] formuliert Algorithmen zur Erzeugung der Geometrie verschiedener Verzahnungsbaueteile und untersucht deren Herstellbarkeit und Tragfähigkeit – Schneckenräder waren nicht Gegenstand der Untersuchungen. Während ausgewählte Metalllegierungen (zum Beispiel Edelstahl, Warmarbeitsstahl, Aluminium und Titan) prozesssicher direkt verarbeitet werden können [8], stellen industriell verwendete Kunststoffe die additive Fertigung noch immer vor Herausforderungen.

Ergebnisse mit Laufverzahnungen aus Kompositwerkstoffen [9] deuten jedoch auf die grundsätzliche Machbarkeit hin. Detailliert untersucht wurde die Tragfähigkeit von Schraubrad- und Schneckengetrieben mit Rädern aus spritzgegossenem Kunststoff von Barton [10]. Die additive Herstellbarkeit der speziellen Geometrie von Schneckenverzahnungen konnte durch eigene Vorversuche gezeigt werden. Die entsprechenden Fertigungsanlagen sind am Ohm-CMP verfügbar.

Das zentrale Defizit additiv gefertigter Verzahnungen, nämlich die raue und grobporige Oberfläche ist bei Schneckengetrieben von geringer Relevanz, da sich durch die Gleitbedingungen im Kontakt die Oberflächen der Verzahnungspartner in jedem Fall durch Verschleiß aneinander anpassen [10], [11], [12]. Zusätzliches Potenzial bietet zudem eine geometrische Optimierung der Flankengeometrie gegenüber den nach DIN 3975-1 [1] definierten Flankenformen.

Zur Berechnung der Lastverteilung im Zahnkontakt existieren verschiedene Tragbildberechnungsprogramme, zum Beispiel SNETRA [13] und ZSB [14]. Unabdingbar für eine entsprechende Methode ist dabei die Kenntnis der Verformung der Verzahnungsbauteile unter Last. Dieses Wissen wurde bereits in eigener Vorarbeit [15] zur Durchbiegung der Schneckenwelle erarbeitet.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Das Vorhaben untersucht die grundsätzliche Eignung additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Schneckenverzahnungen mit verschleißbedingtem Einlauf der Oberflächen. Forschungsziel ist die Herstellung einer Praxisverzahnung in ausreichend guter Verzahnungsqualität, die Inbetriebnahme eines geeigneten Getriebeprüfstandes sowie das Durchführen von stichpunktartigen Laufversuchen.

Zentrales Ergebnis ist eine vergleichende Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit einer additiv gefertigten Laufverzahnung mit einer klassisch spanend hergestellten. Die Ergebnisse finden Eingang in einen Forschungsantrag bei der FVA zur Einreichung bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und werden auf der „International Conference on High Performance Plastic Gears 2025“ in München vorgestellt. Zudem ist das Thema perspektivisch Gegenstand von Untersuchungen des DIN-AK Schneckengetriebe, dem der Antragsteller angehört. Gegenstand des Antrags ist weiter eine vorbereitende Zusammenarbeit mit einem Industriepartner zur Qualitätsuntersuchung von additiv hergestellten Verzahnungsbauteilen.

4 Additive Herstellung von Schneckenrädern

Die Untersuchung der Eignung verschiedener additiver Verfahren zur Herstellung von Schneckenrädern wird anhand eines Referenz-Praxisgetriebes untersucht. Die Verzahnungsdaten des Referenzgetriebes sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Achsabstand a mm	Übersetzung $i = z_2 / z_1$	Axialmodul m_x mm	Zahnbreite b_2 mm	Zahnhöhe h_1 / mm	Normaleingriffswinkel α_0 / Grad °
40	28 / 1	2,1	15	4,4	22

Tabelle 1: Verzahnungsdaten des Referenz-Praxisgetriebes

Am OHM-CMP stehen die additiven Fertigungsverfahren Fused Deposition Modeling (FDM), selektives Laser-Sintern (SLS), Stereolithografie (SLA) und selektives Laser-Schmelzen (SLM) für die Herstellung der Schneckenräder zur Verfügung. Da in Schneckengetrieben zur Vermeidung von Fressschäden aufgrund des hohen Gleitanteils im Zahnkontakt üblicherweise eine Hart-Weich-Werkstoffkombination

aus Stahl und Bronze verwendet wird, werden im Laufe des Projektes nur Schneckenräder aus Kunststoffmaterialien untersucht. Als mögliche Werkstoffe stehen für die FDM-Fertigungstechnologie Polylactide (PLA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polyethylenterephthalat (PETG) zur Verfügung. Im SLS-Verfahren kann Nylon12 verarbeitet werden und im SLA-Verfahren Clear V4 des Herstellers Formlabs. In Abbildung 1 sind Schneckenräder der gleichen Geometrie aus verschiedenen Materialien beispielhaft abgebildet.



Abbildung 1: Schneckenräder aus den Materialien (von links): Bronze, Nylon12, PLA und ABS. Bild: Johannes Gründer

In den nachfolgenden Vorversuchen am Tribometer wird das tribologische Verhalten von PETG, PLA, Nylon12 und Clear V4 untersucht. Die Schneckenräder werden bei der Herstellung unabhängig vom Fertigungsverfahren liegend im Bauraum angeordnet (vgl. Abbildung 3).

5 Reibungs- und Verschleißversuche am Tribometer

5.1 Herangehensweise und Versuchsaufbau zum Tribometer-Prüfstand

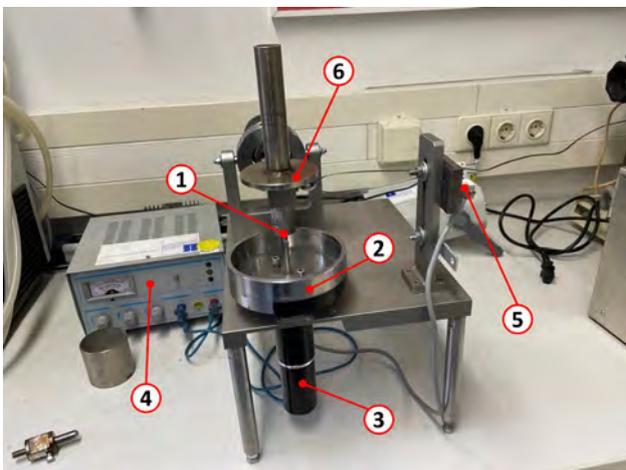


Abbildung 2: Für die Voruntersuchungen verwendetes Scheibe-Stift-Tribometer. Bild: Andreas v. Lattre-Hertel

Zur grundsätzlichen Abschätzung der Eignung von Werkstoffen, beziehungsweise Werkstoffkombinationen wird der Reibkoeffizient μ und dessen Verlauf über einen Gleitweg von $s = 1.000$ Meter mittels eines Scheibe–Stift-Tribometers ermittelt. Aufbau und die Vorgehensweise entsprechen der Norm ASTM G99 [16]. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt das verwendete Tribometer. Der zylinderförmige Stift wird in eine Klemmvorrichtung eingespannt (1) und mit einer definierten Normalkraft F_N auf die sich drehende Scheibe (2) gedrückt. Die Scheibe wird mit einem Elektromotor (3) angetrieben und über das Netzteil (4) die Spannung beziehungsweise die Drehzahl eingestellt. Die Gleitgeschwindigkeit v im Kontakt wird über die gemessene Drehzahl der Scheibe und dem Abstand des Pins zur Drehachse berechnet.

Die Reibkraft F_R wird mittels einer Kraftmessdose (5) erfasst und die Normalkraft F_N mittels Gewichtsscheiben (6) eingestellt. Die verwendete Scheibe besteht wie die Schnecke im Referenzgetriebe aus dem Werkstoff 16MnCr5. Die Oberflächenhärte der Schneckenwelle wird in diesem Versuch aufgrund der weicheren Kunststoffe vernachlässigt. Die zylinderförmigen Stifte werden additiv hergestellt und weisen einen Radius von 5 mm an der Kontaktseite zur Scheibe auf. In Tabelle 2 sind die am Tribometer untersuchten Werkstoffe aufgelistet, Besonderheiten bei der Herstellung sind zusätzlich vermerkt.

Alle Stifte werden im Trockenlauf sowie mit zwei Schmierfetten aus der Praxis (Fett 1 und Fett 2) getestet. Jede Werkstoff-/Schmierstoffkombination wird unter den in Tabelle 3 aufgeführten Lastparametern getestet. Der Gleitweg s beträgt stets 1.000 m.

Material	Druckrichtung	Belastungsrichtung
PETG	liegend	parallel quer
	stehend	-
PLA	stehend	-
Clear V4	-	-
Nylon12	-	-

Nr.	Gleitgeschwindigkeit $v / (m/s)$	Normalkraft F_N / N
1	0,7	19,62
2	0,4	28,43
3	0,7	28,43
4	0,7	39,24

Tabelle 2: Am Tribometer untersuchte Stifte

Tabelle 3: Lastparameter

Die Druckrichtung beschreibt beim FDM-Druck die Lage der Bauteile im Bauraum bei der Herstellung beim schichtweisen Aufbau des Bauteils, siehe Abbildung 3. Bei mittels SLS hergestellten Teilen ist diese Unterscheidung aufgrund des verschiedenen Herstellungsprozesses zunächst nicht notwendig. Die Unterscheidung der Belastungsrichtung beschreibt, in welcher Ausrichtung sich die Druckschichten relativ zur Gleitrichtung befinden, siehe Abbildung 4.

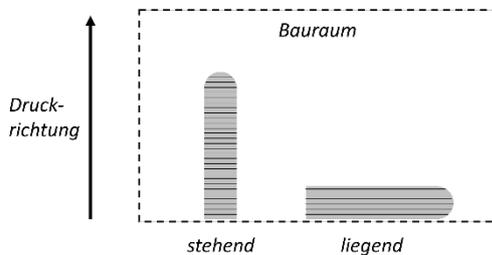


Abbildung 3: Richtung der Schichten in den Bauteilen bei additiver Fertigung.

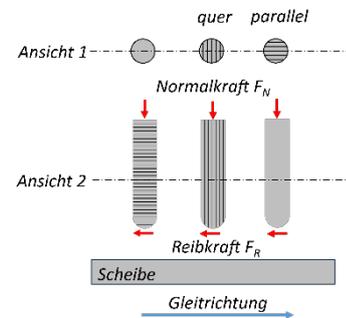


Abbildung 4: Anordnung der Schichten bei verschiedenen relativen Ausrichtungen.

5.2 Versuchsergebnisse

Der Reibkoeffizient μ wird aus der Normalkraft F_N und der gemessenen Reibkraft F_R berechnet. Abbildung 5 bis 8 zeigen einen Auszug der am Tribometer aufgezeichneten, in den Reibkoeffizient umgerechneten Messkurven für verschiedene Werkstoffe bei einer Gleitgeschwindigkeit von $v = 0,7$ m/s und $F_N = 28,43$ N über einen Gleitweg von $s = 1.000$ m.

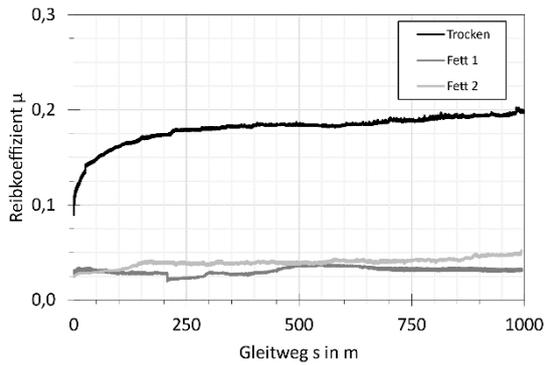


Abbildung 8: Nylon12 bei $v=0,7$ m/s und $F_N=28,43$ N.

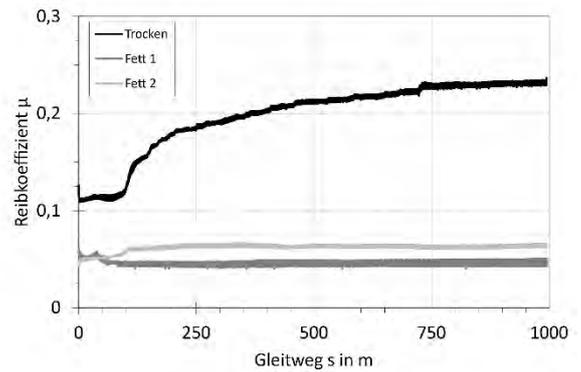


Abbildung 5: PETG bei $v=0,7$ m/s und $F_N=28,43$ N.

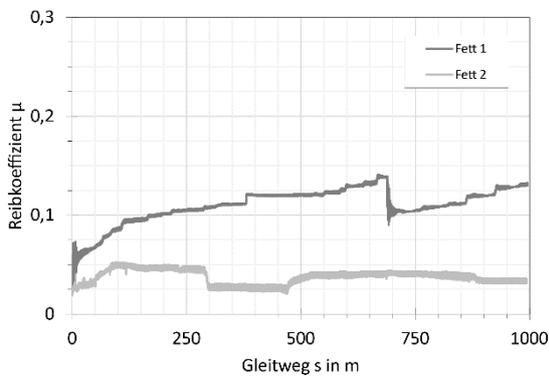


Abbildung 7: ClearV4 bei $v=0,7$ m/s und $F_N=28,43$ N.

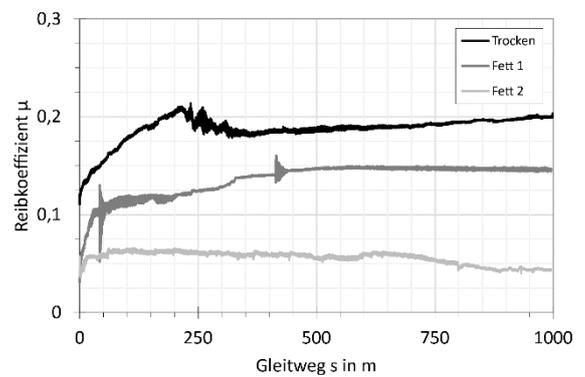


Abbildung 6: PLA bei $v=0,7$ m/s und $F_N=28,43$ N.

Der Einsatz von Schmierfett verringert für Nylon12 und PETG deutlich die Reibung zwischen den Kontaktkörpern. Im Gegensatz zu Nylon12 nimmt der Reibkoeffizient bei PETG ohne Schmierfett jedoch deutlich stärker zu. Es sind charakteristische Plateaus zu erkennen, die auf den schichtweisen Aufbau der Stifte zurückzuführen sind. Im geschmierten Zustand ist die Reibung bei PETG ebenfalls höher als bei Nylon12.

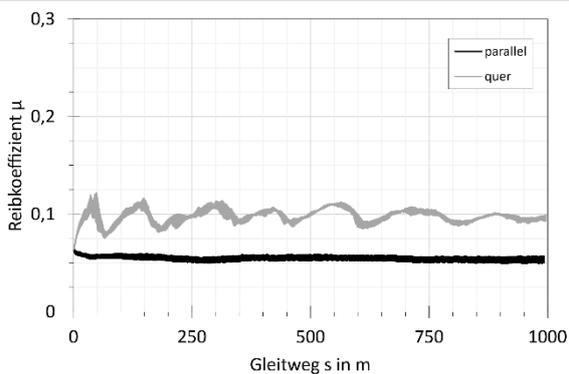


Abbildung 9: Reibkoeffizient für PETG bei $v = 0,7$ m/s und $F_N = 39,24$ N für parallel bzw. quer zur Gleitrichtung liegende Schichten.

Für ClearV4 zeigen sich auch bei Schmierung im Vergleich zu den anderen Werkstoffen hohe Reibwerte, wobei der Wechsel des Schmierfettes von 1 auf 2 eine deutliche Reduzierung der Reibung verursacht. Es sind ebenfalls deutlich ausgeprägte Plateaus aufgrund der Bauteilschichten zu erkennen. Auf Versuche im Trockenlauf wurde aufgrund der bereits unter Schmierung ungünstigen Bedingungen

verzichtet. Das günstigste Verhalten weist im Gesamten der Werkstoff Nylon12 auf. In den Laufversuchen werden daher lediglich Schneckenräder aus Nylon12 untersucht.

Abbildung 9 zeigt den Unterschied des Reibkoeffizienten bei Ausrichtung der Schichten parallel oder quer zur Gleitrichtung. Die Reibung ist bei quererer Ausrichtung größer als bei Paralleler und weist deutliche Schwankungen auf.

6 Ansatz zur Vorausberechnung der auf der Flanke eingebrachten Reibleistung

In den Untersuchungen von Barton [10] werden die verschiedenen Gründe für den Ausfall von Schraub- rädern aus Kunststoff meist auf das nachteilige Verhalten des Werkstoffes bei der durch Reibung im Zahnkontakt auftretenden Temperaturerhöhung zurückgeführt. Der Temperatureintrag auf die Rad- flanken ist direkt abhängig von der dort auftretenden Reibung. Daubach [17] berechnet den fortschrei- tenden Verschleiß an Schneckenrädern mit einem auf lokaler Reibenergiedichte basierenden Ansatz. Durch Berechnung der Reibleistung kann in erster Näherung auf den lokalen Temperatureintrag auf die Zahnflanke geschlossen werden. Die Reibleistung P_R wird in jedem Kontaktpunkt nach Gl. (1) berechnet.

$$P_R = F_N \cdot \mu \cdot v_g \quad (1)$$

Wie in Kapitel 5 gezeigt, ergibt sich bei der additiven Fertigung bedingt durch den schichtweisen Aufbau der Bauteile potenziell eine in jedem Kontaktpunkt auf der Flanke zwischen Schnecke und Rad verschiedene, positionsabhängige Zahnreibungszahl bei Festkörperkontakt. In Schneckengetrieben ist die lokale Gleitrichtung im Zahnkontakt aufgrund des Wälzgleitens stark verschieden. In Abbildung 10 ist die Gleitrichtung am Mittenkreisdurchmesser und in Abbildung 11 für eine theoretische Berührlinie relativ zu den Schichten im Bauteil bei liegender Herstellung des Zahnrades dargestellt.

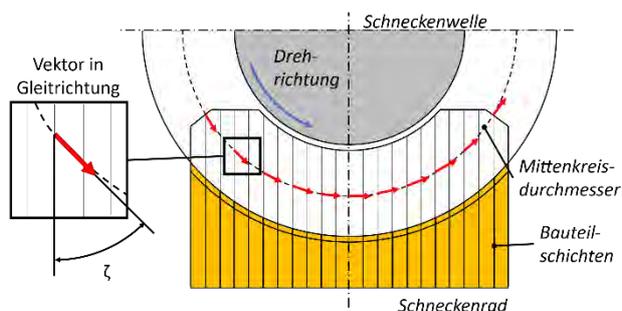


Abbildung 11: Vektoren in Gleitrichtung am Mittenkreisdurchmesser und Winkel ζ zwischen lokaler Gleitrichtung und den Bauteilschichten. Bild: Eigene Darstellung

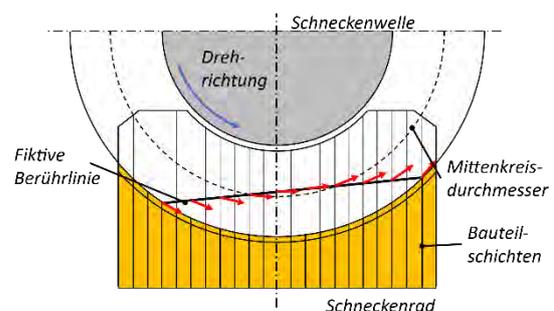


Abbildung 10: Vektoren in Gleitrichtung entlang einer Berührlinie im Zahnkontakt. Bild: Eigene Darstellung

Zur Berechnung von Tragbildern und Lastverteilungen wird das Programm SNETRA [13] der Forschungsvereinigung für Antriebstechnik e.V. verwendet. Abbildung 12 zeigt die Lastverteilung der Praxisverzahnung bei abweichungsfreiem Tragbild. Die relative Gleitgeschwindigkeit in den Kontaktpunkten ist in Abbildung 13, die Zahnreibungszahl μ in Abhängigkeit des Winkels ζ zwischen Gleit- und Schichtrichtung in Abbildung 14 dargestellt. Abbildung 15 zeigt die berechnete Reibleistung P_R im Zahnkontakt.

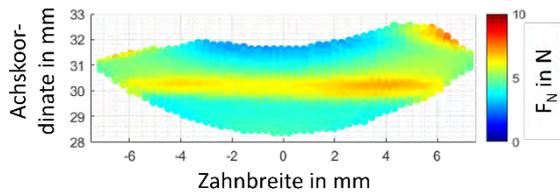


Abbildung 12: Normalkraft F_N .

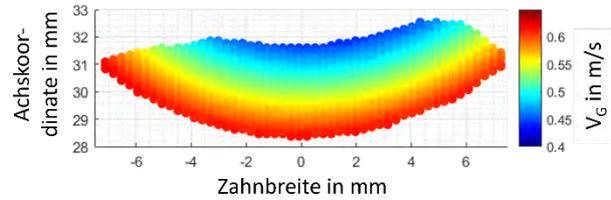


Abbildung 13: Gleitgeschwindigkeit V_G .

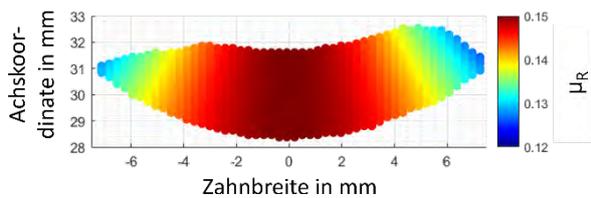


Abbildung 14: Positionsabhängiger Reibkoeffizient μ .

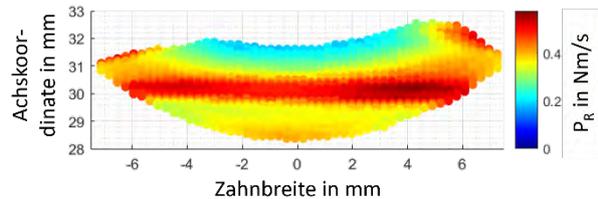


Abbildung 15: Reibleistung P_R .

Die Abschätzung der an jedem Punkt der Zahnflanke auftretende Reibleistung – zunächst für Trockenlauf – ermöglicht gezielte Modifikationen zur Verringerung des gesamten Wärmeeintrages oder lokaler Temperaturüberhöhungen:

- Modifikation von Flankengeometrie und/oder Steifigkeiten zur gleichmäßigeren Lastverteilung,
- Optimieren des additiven Herstellprozesses zur Reduktion des Reibkoeffizienten oder Verschiebung des Bereichs höchster Reibwerte hin zu Bereichen geringer Lasten oder Gleitgeschwindigkeiten.

7 Laufversuche am Prüfstand

7.1 Prüfprinzip, Versuchsplanung und Durchführung

Der im Rahmen des Projektes zur Durchführung von Laufversuchen aufgebaute Prüfstand ist in Abbildung 16 dargestellt. Die Schneckenwelle wird von einem Motor angetrieben. Für diesen kann die Antriebsdrehzahl n_1 stufenlos vorgegeben werden. Das Lastmoment T_2 am Abtrieb (Radwelle) wird mittels einer an einem umlaufenden Hebelarm befestigten Masse m mit Abstand h zur Radachse aufgegeben und ergibt sich somit aus der Gewichtskraft F_g . Das Prinzip der Lasteinleitung ist in Abbildung 17 dargestellt.

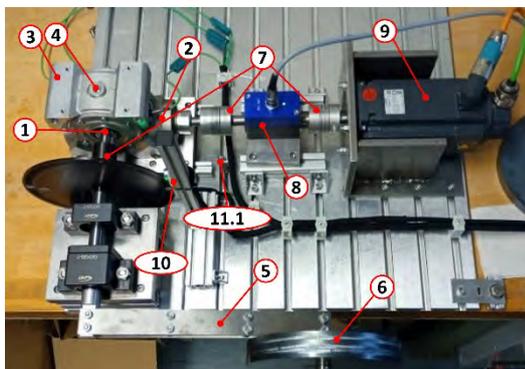


Abbildung 17: Draufsicht auf den Schneckengetriebeprüfstand. Bild: Johannes Gründer

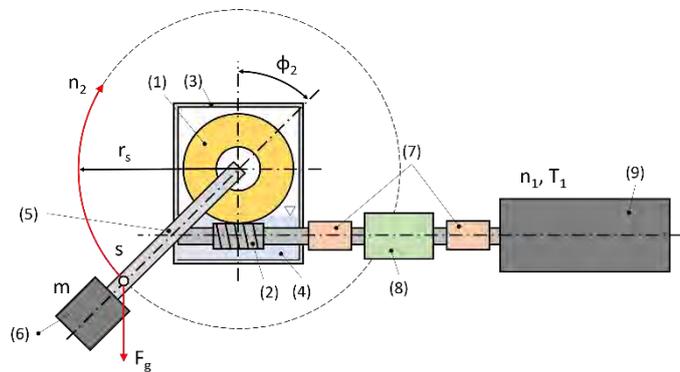


Abbildung 16: Schematischer Aufbau des Prüfstandes und Wirkprinzip zur Aufbringung des Abtriebsdrehmoments. Bild: Johannes Gründer

Das Getriebe durchläuft bei einer Umdrehung des Schneckenrades somit ein sinusförmiges Lastprofil, wodurch die Zähne am Umfang des Rades eine unterschiedliche Belastung bei gleicher Gleitgeschwindigkeit erfahren. Die effektive Belastung an den Zähnen des Rades ist zusätzlich abhängig von der Überdeckung im Eingriff zwischen Schnecke und Rad.

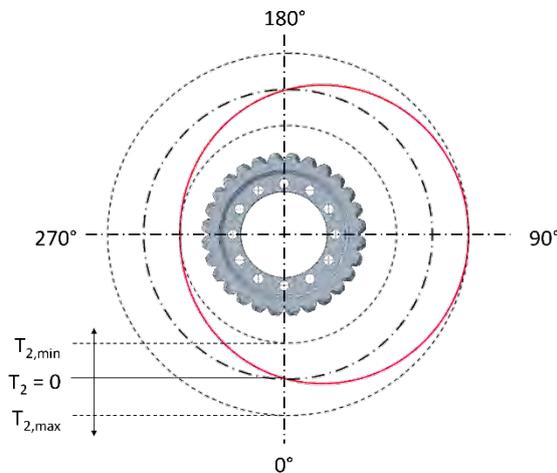


Abbildung 18: Qualitative Verteilung des Abtriebsdrehmoments T_2 auf die Zähne am Umfang des Schneckenrades unter Vernachlässigung der Überdeckung.

Die prinzipielle Lastverteilung auf die Zähne des Rades in Abhängigkeit von deren Position am Umfang ist in Abbildung 18 dargestellt. Das Abtriebsdrehmoment schwankt dabei periodisch zwischen $T_{2,min}$ und $T_{2,max}$ für den Positionswinkel ϕ_2 des Schneckenrades zwischen 0° und 360° . Somit stellt sich während eines Versuches kein konstanter Schmierzustand in den Zahnflanken ein. Allerdings kann eine qualitative Aussage über die Lastabhängigkeit des Tragbildes sowie des Verschleißes durch die Untersuchung der verschieden belasteten Zähne des Rades erfolgen.

Die Charakterisierung der Reibung zwischen den Zahnflanken von Schnecke und Rad erfolgt über die Temperatur nahe dem Zahneingriff. Eine geringe Temperatur entsteht so bei günstigeren Reibbedingungen, eine höhere Temperatur bei schlechteren. Dazu wird die Temperatur im Getriebegehäuse nahe am Zahneingriff sowie die Umgebungstemperatur mit Thermoelementen Typ K erfasst. Der Versuchsplan für die durchgeführten Laufversuche ist in Tabelle 4 aufgelistet.

Die Charakterisierung der Reibung zwischen den Zahnflanken von Schnecke und Rad erfolgt über die Temperatur nahe dem Zahneingriff. Eine geringe Temperatur entsteht so bei günstigeren Reibbedingungen, eine höhere Temperatur bei schlechteren.

Da sich in den Versuchen am Tribometer (Kapitel 5) Nylon12 als der am besten geeigneter Werkstoff herausgestellt hat, werden die Laufversuche hinsichtlich der Kunststoffe auf diesen beschränkt. Alle Versuche werden bei einem maximalen Abtriebsdrehmoment von $T_{2,max} = 24 \text{ Nm}$ durchgeführt, da die Herstellerspezifikation für das Referenzgetriebe ein maximales Drehmoment von $T_{2,max} = 80 \text{ Nm}$ vorgibt und somit eine frühzeitige Überlastung der Kunststoffräder aufgrund der deutlich geringeren Festigkeit des Kunststoffs gegenüber Bronze vermieden werden kann.

Versuchs-Nr.	Schneckenradwerkstoff	Schmierung	Antriebsdrehzahl n_1 /(1/min)
1 2	Bronze	Fett 1	500 1.000
3 4		Fett 2	
5 6	Nylon12	Fett 1	
7 8	Nylon12	Fett 2	
9	Nylon12	Trockenlauf	500

Tabelle 4: Versuchsplan für die Laufversuche bei $T_{2,max} = 24 \text{ Nm}$

In Vorversuchen mit der Referenzverzahnung aus Bronze und Fettschmierung bei $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ und $n_1 = 1.000 \text{ min}^{-1}$ mit $T_{2,max} = 24 \text{ Nm}$ konnte festgestellt werden, dass sich nach etwa fünf Stunden Versuchsdauer eine Beharrungstemperatur im Getriebe einstellt. Aus diesem Grund wird die Versuchsdauer für alle Untersuchungen auf fünf Stunden festgelegt unter der Annahme, dass sich nach dieser Laufzeit ein konstantes Betriebsverhalten und thermisches Gleichgewicht einstellt.

Die Dosierung der Schmierfette vor Versuchsbeginn erfolgt mit einer handelsüblichen Spritze. Für die Schmierung der Verzahnung werden in jedem Versuch etwa 10 ml Schmierfett verwendet. Abbildung 19 zeigt eine mit Fett geschmierte Schnecke, Abbildung 20 eine mit Fett geschmierte Zahnücke am Schneckenrad vor Einbau beziehungsweise vor Versuchsbeginn. Für die Versuche 1-4 wird dasselbe

Schneckenrad aus Bronze verwendet und vor dem Schmierstoffwechsel entfettet. Ein versuchsübergreifendes Einlaufverhalten ist hier nicht auszuschließen.

Für die Versuche 5-9 wird bei Wechsel des Schmierstoffes jeweils ein neues Schneckenrad aus Nylon12 verwendet, da der Kunststoff das im Schmierfett enthaltene Öl teilweise aufsaugt.



Abbildung 20: Schmierfett in einer Schneckenwelle.
Bild: Johannes Gründer



Abbildung 19: Schmierfett in den Zahnluken eines Bronze-Schneckenrades. Bild: Johannes Gründer

7.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

In Abbildung 21 ist die Übertemperatur nahen dem Zahneingriff gegenüber der Umgebungstemperatur für die Versuchs-Nr. 1, 3, 5 und 7 bei einer Drehzahl von $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ und in Abbildung 22 für die Versuchs-Nr. 2, 4, 6 und 8 bei einer Drehzahl von $n_1 = 1.000 \text{ min}^{-1}$ dargestellt. In allen Versuchen liegt das maximale Abtriebsdrehmoment bei $T_{2,\text{max}} = 24 \text{ Nm}$.

Um bei den im Getriebegehäuse während der Versuche gemessenen Temperaturen eine Aussage über die Erwärmung im Getriebe unabhängig von den Umgebungsbedingungen treffen zu können, werden für alle Messstellen die Übertemperaturen, also der Unterschied zur Raumtemperatur, berechnet. Es stellt sich in allen Versuchen ebenfalls eine Beharrungstemperatur bis zum Ende der Versuchsdauer ein.

Monz [18] hat bei der Untersuchung des Betriebsverhaltens fettgeschmierter Schneckengetriebe gezeigt, dass die Zahnreibungszahl bei gleichem Werkstoff direkt von der Art und Zusammensetzung des Schmierfettes abhängt. Eine größere Zahnreibungszahl bewirkt aufgrund höherer Reibung im Zahnkontakt eine größere Verlustleistung im Getriebe und somit einen geringeren Wirkungsgrad, beziehungsweise eine stärkere Temperaturentwicklung.

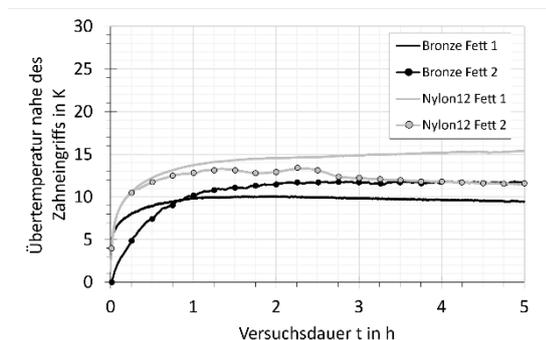


Abbildung 21: Übertemperaturen bei $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ für Nr. 1, 3, 5 und 7.

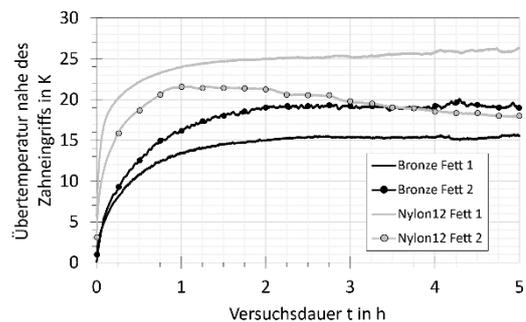


Abbildung 22: Übertemperaturen bei $n_1 = 1.000 \text{ min}^{-1}$ für Nr. 2, 4, 6, 8.

In Abbildung 23 sind die Beharrungstemperaturen für alle durchgeführten Versuche dargestellt. Berechnet werden diese aus dem Mittelwert aller Temperaturwerte zwischen $t = 2 \dots 5 \text{ h}$.

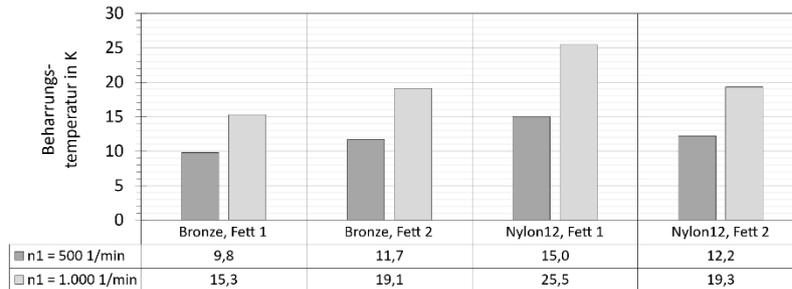


Abbildung 23: Beharrungstemperaturen als Übertemperatur für alle Versuche. Nummerierung nach Tabelle 5.

Der geringste Temperaturanstieg im Getriebe und somit die geringste Zahnreibung trat in den durchgeführten Versuchen beim Bronze-Schneckenrad geschmiert mit Fett 1 auf. Für beide Drehzahlen liegen die Werte deutlich unter den übrigen Versuchsreihen. Ein vergleichbarer Beharrungszustand stellte sich bei Schmierung mit Fett 2 sowohl für das Schneckenrad aus Bronze als auch für das aus Nylon12 ein. Beim Versuch mit dem Rad aus Nylon12 wurde bei beiden Drehzahlen zunächst eine höhere Temperatur als die Beharrungstemperatur gemessen.

Die Temperatur sank anschließend und nahm bei $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ einen nahezu konstanten, bei $n_1 = 1.000 \text{ min}^{-1}$ einen nach fünf Stunden immer noch fallenden Zustand an. Die Überschwinger können auf ein mit höherer Zahnreibung verbundenes Einlaufverhalten des Zahnrades hindeuten, das aufgrund geometrischer Abweichungen gegenüber den Versuchen 5 und 6 mit dem anderen Nylon12-Rad nicht beobachtet werden konnte. Der ungünstigste Reibungszustand und die höchste Temperatur wurde für das Nylon12-Schneckenrad in Kombination mit Fett 1 festgestellt. Die Tendenz der Temperatur ist zum Versuchsende weiter zunehmend. Die Versuche 5-8 überstanden die Schneckenräder aus Nylon12 unbeschadet.

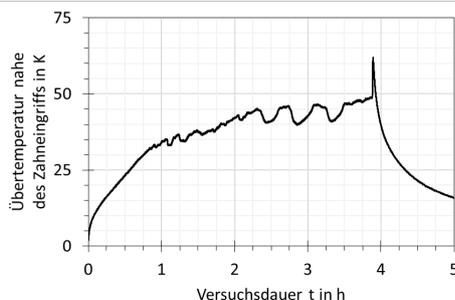


Abbildung 24: Übertemperatur nahe des Zahneingriffs. Schneckenrad aus Nylon12, Trockenlauf, $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ und $T_{Z,max} = 24 \text{ Nm}$.



Abbildung 25: Beschädigtes Schneckenrad aus Nylon12 bei Trockenlauf, Betrieb bei $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ und $T_{Z,max} = 24 \text{ Nm}$. Bild: Johannes Gründer

Zusätzlich zu den Versuchen mit Fett, die allesamt ohne Schädigung des Schneckenrades verlaufen sind, wurde ein Referenzversuch mit einem Schneckenrad aus Nylon12 bei Trockenlauf und einer Drehzahl von $n_1 = 500 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt, siehe Tabelle 5 Versuchs-Nr. 9. Das Ziel hierbei war die Prüfung, ob ein Schneckenrad aus Nylon12 auch ohne Schmierstoff betrieben werden kann. Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Übertemperatur über der Versuchsdauer.

Wie im Temperaturverlauf zu erkennen ist, stellt sich bei Trockenlauf für Nylon12 unter diesen Betriebsbedingungen keine Beharrungstemperatur ein. Die Temperatur nimmt stetig zu; nach einer Laufzeit von etwa drei Stunden und 50 Minuten kam es zum Zahnbruch am Schneckenrad. Das beschädigte Rad ist

in Abbildung 25 dargestellt. Ein ähnliches Schadensbild ist auch in [10] für spritzgegossene Schraubräder aus Kunststoff zu finden. Es wurden insgesamt 16 Zähne entlang des Umfangs ganz oder teilweise abgeschert. Aufgrund der temperaturabhängigen Festigkeit von Nylon12 und der aufgetretenen hohen Temperaturen im Zahnkontakt, die noch über der gemessenen Temperatur nahe dem Zahneingriff liegt, begannen die Zähne sich plastisch zu verformen beziehungsweise das Material unter Last zu fließen. Die Drehmomentmesswelle detektierte einen schlagartigen Anstieg des Drehmoments, und die Antriebseinheit wurde abgeschaltet. Die Nummerierung der Zähne zur Interpretation des Schadensherganges ist in Abbildung 26 dargestellt.

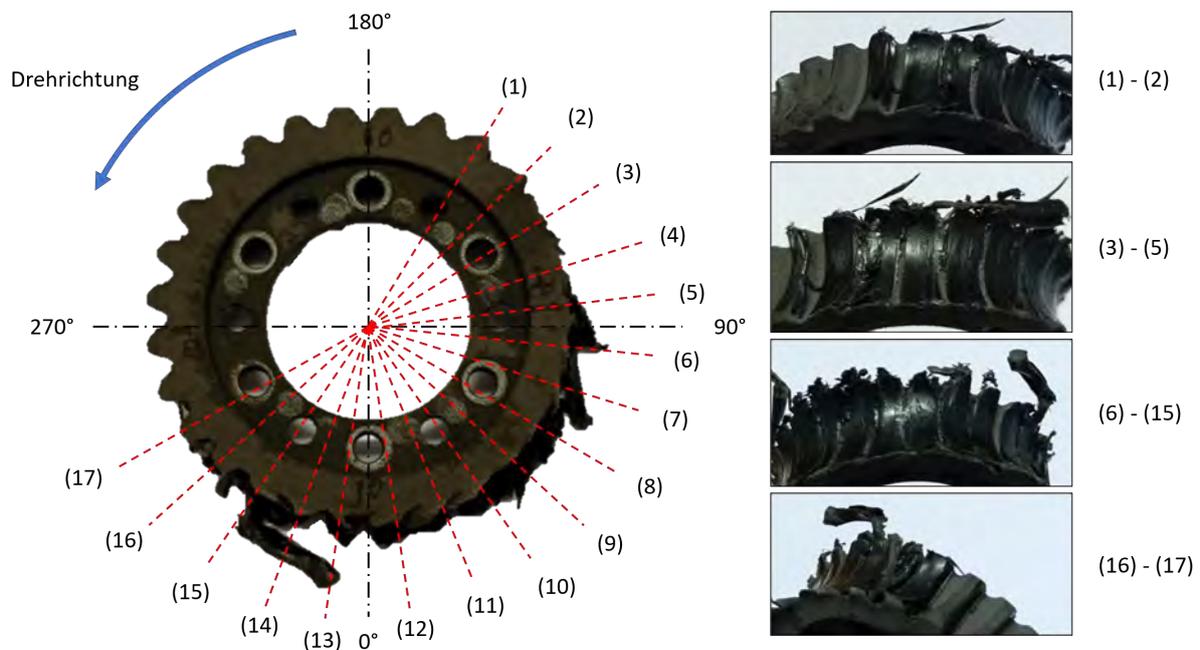


Abbildung 26: Nummerierung der beschädigten Zähne entlang dem Radumfang bezogen auf die Drehrichtung und die anliegende Belastung an der Abtriebswelle. Beginn des Schadensbildes bei Zahn (1) und Ende des Schadensbildes bei Zahn (17).
Bild: Johannes Gründer

Der Schadensverlauf lässt sich wie folgt erklären: Zunächst wurde der sich an (1) befindende Zahn deutlich plastisch verformt. Dadurch wirkte eine höhere Last auf den Zahn (2), der noch stärker ebenfalls plastisch verformt und fast gänzlich abgeschert wurde. Dies führte dazu, dass der Hebelarm mitsamt den Gewichten während des Hochfahrens ruckartig ein Stück in die entgegengesetzte Richtung rotierte. Die somit erhöhte Energie beim Aufprall auf den nächsten intakten Zahn bei (3) scherte diesen sowie die darauffolgenden Zähne (4) und (5) gänzlich ab. Die nächsten Zähne (6) – (17) wurden ebenfalls abgeschert, die Wucht der zurückrotierenden Masse nahm jedoch ab. Es wurde deutlich mehr Material im Vergleich zu den Zähnen (3) – (5) verdrängt und in die folgenden Zahnlücken gedrückt. Die letzten beiden Zähne (16) und (17) sind nur zur Hälfte der Zahnhöhe abgeschert.

8 Fazit und Ausblick

Die Möglichkeit der Herstellung von Schneckenrädern mit verschiedenen additiven Fertigungsverfahren und Werkstoffen konnte grundsätzlich nachgewiesen werden. Eine detaillierte Überprüfung der erzielbaren Genauigkeiten und Verzahnungsqualitäten steht zum aktuellen Stand des Projektes noch aus.

In den Untersuchungen am Tribometer wurden die grundlegenden Reibeigenschaften verschiedener in der additiven Fertigung verwendeter Kunststoffe bei Paarung mit dem Einsatzstahl 16MnCr5 untersucht. Bei Verwendung der Praxisschmierfette zeigte sich stets eine Verbesserung gegenüber dem Trockenlauf, wobei die Fette je nach Kunststoff eine abweichende Wirkung gezeigt haben. Die geringste Reibung konnte für den Werkstoff Nylon12 festgestellt werden. Aus diesem Grund wurden die Schneckenräder für die Laufversuche in einem Praxisgetriebe am Prüfstand aus Nylon12 hergestellt.

Es wurden in den Versuchen sowohl Bronze- als auch Kunststoffräder und der Einsatz verschiedener Schmierfette aus der Praxis bei zwei Betriebspunkten mit gleichem Abtriebsdrehmoment und verschiedener Antriebsdrehzahl untersucht. In den Laufversuchen zeigte sich bei der Temperaturentwicklung eine gegenläufige Tendenz im Vergleich zu den Ergebnissen am Scheibe–Stift-Tribometer für das Rad aus Nylon12 bei den beiden Schmierfetten.

Es ist nicht auszuschließen, dass geometrische Abweichungen bei der Herstellung der Räder die Ursache dafür sind. Grundsätzlich verhält sich Nylon12 bei den untersuchten Betriebsbedingungen und bei Schmierung mit Fett jedoch ähnlich wie Bronze mit einer leicht schlechteren Tendenz. Schäden an den Kunststoffrädern konnten beim Einsatz von Fett während der Versuchsdauer nicht beobachtet werden. Im Trockenlauf ist Nylon12 jedoch ungeeignet. Das Rad fiel bereits nach kurzer Laufzeit durch einen Gewaltbruch und Abscheren von mehr als der Hälfte der Radzähne aufgrund enormer Temperaturentwicklung und damit reduzierter Festigkeit aus.

Im Rahmen des Projektes wurde die Grundlage zur weiteren Untersuchung additiv hergestellter Schneckenräder geschaffen.

Gegenstand weiterer Forschung kann sein:

- Überprüfung der mittels additiver Fertigung erreichbaren Verzahnungsqualitäten der Schneckenräder.
- Betriebsverhalten additiv hergestellter Verzahnungen bei
 - anderen Werkstoffen,
 - anderen Fertigungsparametern,
 - anderen Lasten (Drehmoment, Drehzahl),
 - anderen Schmierstoffen und
 - längeren Versuchsdauern.
- Modifikation der Geometrie, Herstellung und Überprüfung im Laufversuch.

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung ist das Vorhaben noch nicht abgeschlossen.

9 Literatur

- [1] DIN 3975-1: „Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zylinder-Schneckengetriebe mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen – Teil 1: Schnecke und Schneckenrad“. Beuth, September 2017.
- [2] DIN 3975-2: „Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zylinder-Schneckengetriebe mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen Teil 2: Abweichungen“. Beuth, Juli 2002.
- [3] DIN 3996: „Tragfähigkeitsberechnung von Zylinder-Schneckengetrieben mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen“. Beuth September 2019.
- [4] VDI-Richtlinie 2736 Blatt 3: „Thermoplastische Zahnräder. Schraubradgetriebe. Paarung Zylinderschnecke Schrägstirnräd.“ Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Richtlinien, 2014
- [5] Hasse, A.: "Synthesis of Planar Compliant Mechanisms with Selective Compliance for Shape Adaptation", ETH Zürich, 2011.
- [6] Gebhardt, A.: „Additive Fertigungsverfahren.“ München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co.KG, 2016.
- [7] Träger, M.: „Additive Fertigung von Kunststoffzahnradern – Konstruktionsalgorithmen, automatischer Entwurf von Stirnradstufen, Herstellbarkeit und Tragfähigkeit“, Technische Universität München, Dissertation. 2017
- [8] Gibson, I.: "Additive Manufacturing Technologies." Berlin, Heidelberg, Springer.
- [9] Chernets, M.: „Wear resistance of Glass- and Carbon-Filled Polyamid Composites for Metal-Polymer-Gears“, J. Frict. Wear, Bd. 39, Nr. 5.
- [10] Barton, P.: „Tragfähigkeit von Schraubrad- und Schneckengetrieben der Werkstoffpaarung Stahl/Kunststoff“, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation. 2000
- [11] Sigmund, W.: „Untersuchung und Simulation des Verschleißverhaltens von Schneckengetrieben mit unvollständigem Tragbild“, TU München, München, 2015.
- [12] Argatov, I., Chai, Y. S.: „Wearcontactproblem with friction: Steady-state regime and wearing - in period. J“, J. Solids Struct., Bd. 193–194, S. 213–221.
- [13] Lutz, M.: „Methoden zur rechnerischen Ermittlung und Optimierung von Tragbildern an Schneckengetrieben“, Technische Universität München, Dissertation. 2000
- [14] Predki, W.: „Hertzische Drücke, Schmierpalshöhen und Wirkungsgrade von Schneckengetrieben“, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation. 1982
- [15] Gründer, J. Monz, A., Norgauer, P.: „Advanced calculation of the deflection of worm shafts with FEM“. 2021.
- [16] ASTM G99: "Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disc Apparatus". 2018.
- [17] Daubach, K., Oehler, M., Sauer, B.: „Wear simulation of worm gears based on an energetic approach“. Forschung im Ingenieurwesen, Springer Verlag. 2021
- [18] Monz, A.: „Tragfähigkeit und Wirkungsgrad von Schneckengetrieben bei Schmierung mit konsistenten Getriebefetten“, Technische Universität München, Dissertation. 2012

REnuka – Reduktion von Emissionen durch nachhaltige Binder für Hochleistungskeramiken

Prof. Dr.-Ing. Dominik Söthje
Fakultät Angewandte Chemie

Prof. Dr.-Ing. Hannes Kühl
Fakultät Werkstofftechnik

Florian Bauer, M. Sc.
Fakultät Angewandte Chemie

Julian Beier, B. Sc.
Fakultät Angewandte Chemie

Handoyo Hendrawidjaja, B. Sc.
Fakultät Verfahrenstechnik

Zusammenfassung:

In diesem Vorhaben wurden verschiedene Bindemittel für die Herstellung von Hochleistungskeramiken analysiert. Ziel war es, biobasierte Binder zu identifizieren, die konventionelle auf fossilen Ressourcen basierende Systeme in Zukunft ersetzen können. Es wurden drei erdölbasierte Referenz-Bindersysteme und sieben biobasierte Alternativen bezüglich ihrer thermischen Stabilität unter Sauerstoffatmosphäre, der Viskosität ihrer wässrigen Lösungen oder Dispersionen sowie daraus hergestellter Schlicker und ihrer Haftung auf Aluminiumoxid-basierter Keramik untersucht. Im Rahmen des Vorhabens konnte ein biobasiertes Bindersystem mit Eigenschaften, vergleichbar zum besten Referenzmaterial gefunden werden. Unter Einsatz des biobasierten Binders sowie zweier ausgewählter Referenz-Bindersysteme wurden Grünkörper hergestellt und deren Festigkeit ermittelt. Die Grünkörperfestigkeit ist in der keramischen Industrie ein entscheidender Faktor und stark vom gewählten Bindersystem abhängig. Die erhaltenen Resultate deuten darauf hin, dass der Bio-Binder auch hinsichtlich der Festigkeitswerte den konventionellen Referenz-Bindersystemen als gleichwertig anzusehen ist. Die in diesem Vorlauforschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse können als Ausgangslage für die Beantragung weiterer Fördermittel und die Akquise direkter Drittmittel aus der Industrie dienen.

(Angabe VKI – Verband der keramischen Industrie e.V., 2016) pro Jahr aus und schätzt dabei die Mengenverhältnisse der Formgebungsverfahren und die ungefähr eingesetzten Bindermengen ab, so werden allein in Deutschland Bindemittel in Höhe von circa 6.200 Tonnen pro Jahr verbraucht und die entsprechende Menge an CO₂ freigesetzt.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Das gesetzte Gesamtziel ist die Substitution von auf fossilen Ressourcen basierten Bindemitteln für Hochleistungskeramiken durch biobasierte Bindemittel zur Reduktion der Emission von Treibhausgasen. Die Verwendung konventioneller Bindemittel auf der Basis von beispielsweise Erdöl ist hinsichtlich einer immer wichtiger werdenden Green Economy kritisch zu hinterfragen. Im Sinne einer modernen und ökologisch nachhaltigen Gesellschaft müssen neue Konzepte Einzug finden.

Eine Möglichkeit besteht in der Substitution erdölbasierter Bindemittel durch Mittel aus biobasierten polymeren Systemen, erzeugt aus regenerativen Rohstoffen.

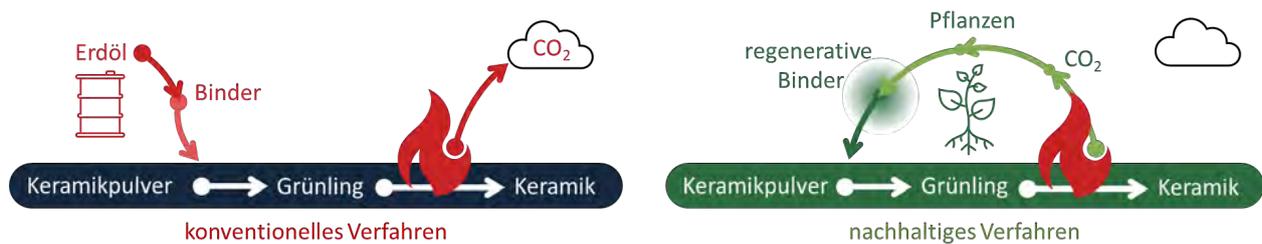


Abbildung 2: Gegenüberstellung des Verfahrens mit konventionellen Bindemitteln (blau) und des innovativen Verfahrens unter Einsatz biobasierter Bindemittel (grün). Bild: Dominik Söthje

In Frage kommende Polymere sind die aus regenerativen Ressourcen erzeugten Cellulose-basierten Polymere wie Cellulosenitrat, Cellophan, Viskose, Lyocell und Celluloseacetat. Auch möglich könnten Stärke- beziehungsweise Zucker-basierte Polymere, wie thermoplastische Stärke (TPS), Polymilchsäure (PLA) oder Polyhydroxybutyrat (PHB) sowie pflanzenölbasierte Polymere, wie beispielsweise Biopolyamid (Bio-PA) oder Biopolyurethan (Bio-PU) sein.



Abbildung 3: Biobasierte Bindemittel. Bild: Florian Bauer

Bei der Verbrennung biobasierter Bindemittel wird nur so viel CO₂ freigesetzt, wie beim Wachstum gebunden wurde. Es können somit erhebliche Mengen „neues“ CO₂ eingespart werden. Im Rahmen dieses Vorhabens sollen die Grundlagen für einen anschließend gestellten, öffentlich geförderten Projektantrag und die direkte Akquise von Drittmitteln aus der Industrie erarbeitet werden.

Der Einsatz biobasierter Polymere als Bindemittel in der keramischen Industrie wurde bisher noch nicht systematisch und grundlegend untersucht. In der einschlägigen Literatur kommt dem Einsatz von

biobasierten Polymeren als Bindemittel bisher keine Bedeutung zu, obwohl durch deren Einsatz ein maßgeblicher Beitrag zur CO₂-Neutralität der industriellen Produktion geleistet werden kann.

Daher sollen im Rahmen von REnuka erstmals der Einsatz von biobasierten Polymeren in der technischen Keramik untersucht und praktikable Ansätze für ein zu beantragendes Nachfolgeprojekt herausgearbeitet werden. Die keramische Industrie arbeitet daran, die für die Herstellung benötigte Energie (Formgebung aber vor allem Sinterung) aus regenerativen Quellen zu beziehen.

Was bisher zu wenig bedacht wird, ist die Tatsache, dass auch die Rohstoffe CO₂-neutral sein sollten. Nur mit diesem Ansatz kann komplette CO₂-Neutralität erreicht werden. Die Herausforderungen in diesem Projekt sind das Finden geeigneter biobasierter polymerer Systeme, die für die jeweilige Formgebungstechnik ideal geeignet sind. Je nach Formgebungsverfahren werden an die eingesetzten Bindemittel unterschiedliche Anforderungen gestellt.

In einem ersten Arbeitspaket sollen konventionell eingesetzte Bindemittel ermittelt, aufgelistet und hinsichtlich ihrer einsatzbestimmenden Eigenschaften systematisch untersucht und charakterisiert werden. Im folgenden Arbeitspaket soll nach auf dem Markt verfügbaren biobasierten Polymeren recherchiert werden. Eine Auswahl wird anschließend beschafft, charakterisiert und mit den Anforderungsprofilen verglichen, die aus den vorangegangenen Untersuchungen der konventionellen Systeme bekannt sind. Der letzte Schritt zielt auf die Herstellung einfacher Grünkörper, um den Einsatz der biobasierten Polymere als Bindemittel bei der Herstellung von Keramiken zu evaluieren. Im Ergebnis soll eine Machbarkeit des gesetzten Gesamtzieles gezeigt werden. Außerdem sollen einfache Messverfahren gefunden werden, mit denen vor aufwendiger Herstellung von Grünkörpern und dem sogenannten Brittle-Ring-Test bereits Aussagen zu einem möglichen Einsatz neuer Binder getroffen werden können.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Für eine umfassende Charakterisierung von Bindersystemen wurden sowohl erdölbasierte Materialien als Referenz als auch biobasierte Binder in die Untersuchungen einbezogen, um verschiedene Aspekte zu beleuchten. Es wurden drei erdölbasierte Referenzsysteme sowie sieben biobasierte Bindemittel analysiert. Die Untersuchungen begannen mit thermogravimetrischen Analysen (siehe Kapitel 4.1), gefolgt von der Bestimmung der Viskositäten der Binder in wässrigen Lösungen und Suspensionen sowie der Schlickeransätze (Kapitel 4.2). Zusätzlich wurden die Haftungseigenschaften der Binder auf Keramikplatten ermittelt (Kapitel 4.3).

Abschließend erfolgte die Herstellung von Grünkörpern unter Verwendung ausgewählter Binder, deren Festigkeiten in Kapitel 4.4 bestimmt wurden. Diese strukturierte Vorgehensweise ermöglichte eine umfassende Untersuchung der verschiedenen Binderarten hinsichtlich ihrer thermischen Stabilität, rheologischen Eigenschaften, Haftungseigenschaften und ihrer Einflüsse auf die Festigkeit der hergestellten Grünkörper und lässt Aussagen über die Machbarkeit des gesetzten Gesamtzieles, genauso wie über die Eignung verschiedener Prüfverfahren für ein weiterführendes Screening in Folgeprojekten zu.

4.1 Thermogravimetrische Analyse (TGA)

Eine wichtige Eigenschaft der Binder ist die rückstandslose Verbrennung im Entbinderungsprozess vor dem Sintervorgang. Um diese zu untersuchen, wurden die Binder einer thermogravimetrischen Analyse unter einer Atmosphäre von synthetischer Luft unterzogen.

Bei der TGA können Proben im Milligramm-Maßstab einem Temperaturprogramm unterzogen und dabei beispielsweise der Masseverlust über die Temperatur bestimmt werden. Es wurden zunächst die erdölbasierten Referenz-Bindersysteme analysiert. Anschließend auch die biobasierten Alternativen als Referenzen gemessen.

Tabelle 1: Temperaturprogramm der TGA.

Start-Temperatur/ °C	40
Heizrate/ K·min⁻¹	10
End-Temperatur/ °C	1000

Thermogravimetrie der erdölbasierten Referenz-Binder

Tabelle 2: Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse der Referenz-Binder.

Bindersystem	Referenz-Binder 1	Referenz-Binder 2	Referenz-Binder 3
T_{z, onset} / °C	303	418	370
Rückstand / Ma-%	0,90	0,00	0,00

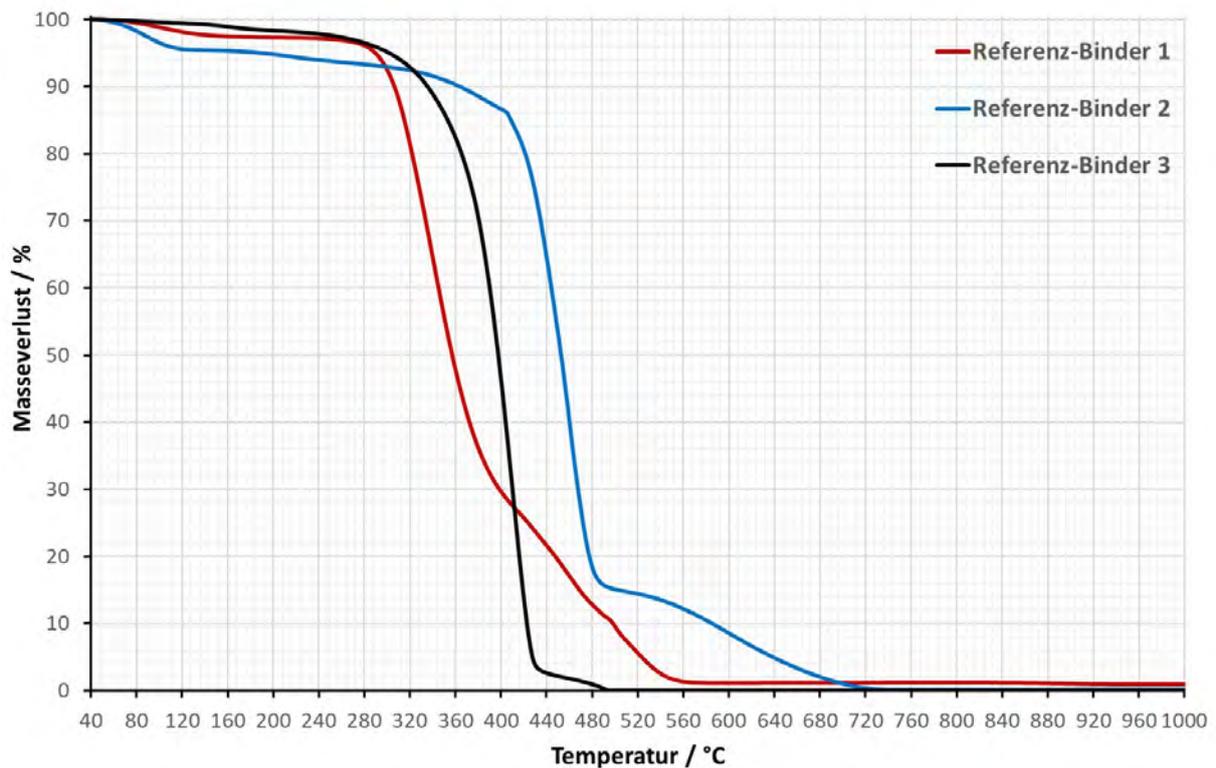


Abbildung 4: Zersetzung der Referenz-Binder unter Sauerstoff-Atmosphäre. Bild: Florian Bauer

Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse der erdölbasierten Binder zeigen, dass sämtliche Rückstände unterhalb der 1-Ma-%-Marke liegen. Dies legt nahe, dass alle Binder eine ausreichende Zersetzung erfahren, wodurch darauf geschlossen werden kann, dass sie keinen nachteiligen Einfluss auf den Sinterprozess ausüben.

4.1.1 Thermogravimetrie der Bio-Binder

Tabelle 3: Ergebnisse der Thermogravimetrischen Analyse der biobasierten Binder.

Bindersystem	Bio 1	Bio 2	Bio 3	Bio 4	Bio 5	Bio 6	Bio 7
$T_{z, \text{onset}} / ^\circ\text{C}$	307	310	310	320	320	250	310
Rückstand / Ma-%	0,00	0,70	1,00	0,30	0,00	0,70	1,40

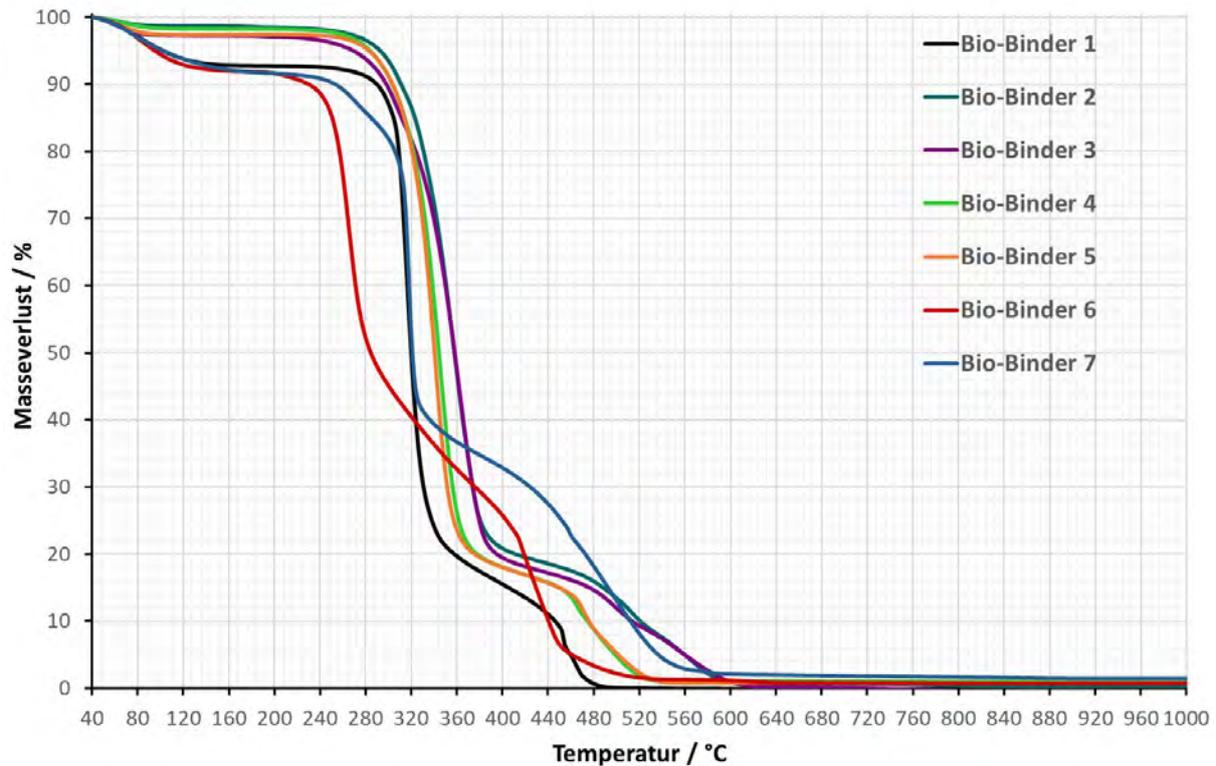


Abbildung 5: Zersetzung der Bio-Binder unter Sauerstoff-Atmosphäre Bild: Florian Bauer

Die Resultate der thermogravimetrischen Analyse der biobasierten Binder weisen auf etwas größere Schwankungen der Veraschungsrückstände im Vergleich zu den Referenz-Bindern hin. Unter den Bio-Bindern zeigt Bio-Binder 7 mit einem Rückstand von 1,4 Ma-% den höchsten Massenrückstand. Dies könnte auf das Vorhandensein anorganischer Bestandteile im Material zurückzuführen sein, das wiederum darauf hinweist, dass der Einsatz dieses Binders möglicherweise Probleme im Sintervorgang verursachen könnte. Hingegen zeigen Bio-Binder 1 und 5 keinerlei Rückstände, und die Rückstände der übrigen Biobinder liegen alle unterhalb von 1 Ma-%.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Bio-Binder hinsichtlich Ihres Veraschungsrückstandes Einsatz in Hochleistungskeramiken finden könnten. Es ist jedoch wichtig, die potenziellen Auswirkungen des höheren Rückstands von Bio-Binder 7 bei weiteren Verarbeitungsschritten zu berücksichtigen, insbesondere im Hinblick auf den Sinterprozess.

4.2 Rheologie

4.2.1 Rheologie an wässrigen Lösungen und Dispersionen

Zur Bestimmung der Viskosität wurden wässrige Lösungen oder Dispersionen mit unterschiedlichen Konzentrationen an Binder hergestellt. Die Löslichkeit der einzelnen Binder in Wasser ist in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 4: Löslichkeit der Binder in Wasser.

Binder-System	Löslichkeit in Wasser / 10 mg·ml ⁻¹
Referenz-Binder 1	löslich
Referenz-Binder 2	löslich
Referenz-Binder 3	unlöslich
Bio-Binder 1	unlöslich
Bio-Binder 2	löslich
Bio-Binder 3	löslich
Bio-Binder 4	löslich
Bio-Binder 5	löslich
Bio-Binder 6	unlöslich
Bio-Binder 7	unlöslich

Die Konzentrationen der Referenz-Binder lagen bei 1 Ma-%, 5 Ma-% und 10 Ma-%. Bei den biobasierten Bindern betragen die Konzentrationen 1 Ma-%, 2 Ma-% und 5 Ma-%. Bei Zugabe der Binder zu Wasser zeigte sich bereits, dass die Viskosität durch Zugabe der Bio-Binder sehr viel stärker ansteigt. Aufgrund dessen konnten keine Lösungen oder Dispersionen mit einer Konzentration von 10 Ma-% hergestellt werden. In Abbildung 4 sind die Viskositäten der Lösungen und Dispersionen der Referenz-Binder bei einer Scherrate von 500 s⁻¹ gezeigt.

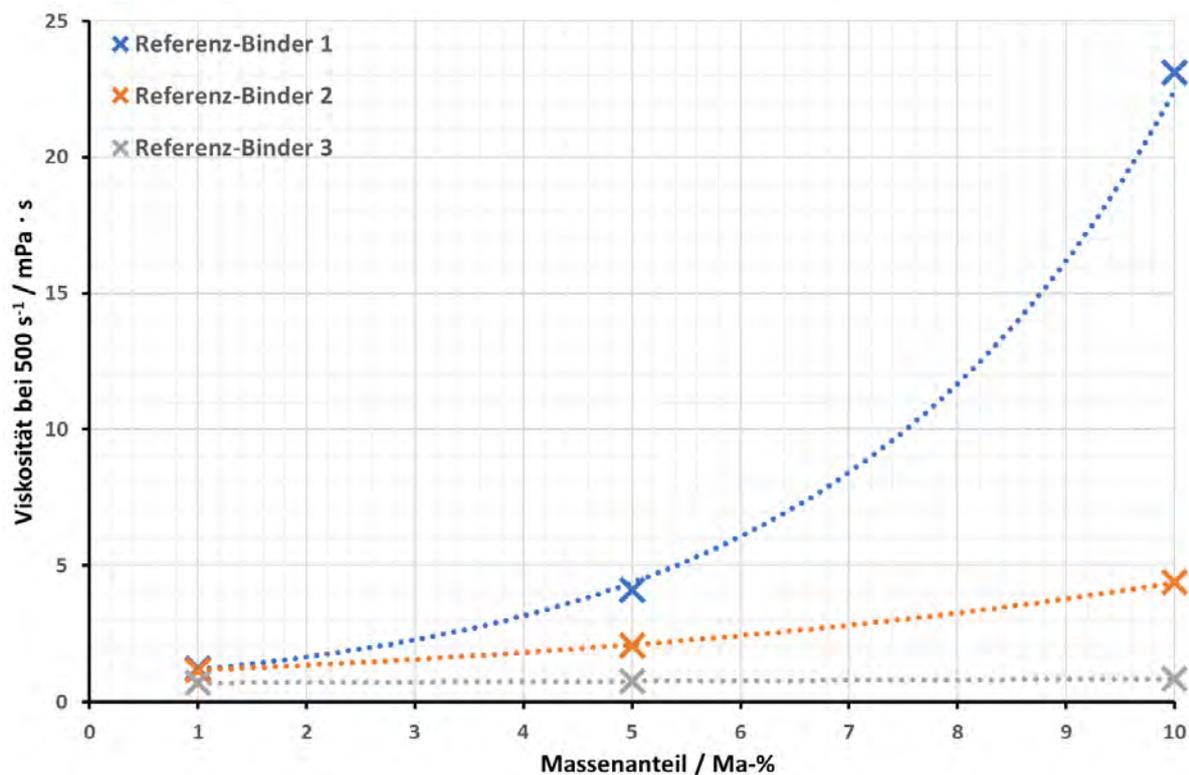


Abbildung 6: Viskositäten der Lösungen und Dispersionen der Referenz-Binder bei einer Scherrate von 500 s⁻¹ in Abhängigkeit der Konzentration. Bild: Florian Bauer

Die Viskositäten der wässrigen Lösungen und Dispersionen der Referenz-Binder zeigen signifikante Unterschiede. Insbesondere wird beim Referenz-Binder 1 ab einem Massenanteil von 5 Ma-% ein exponentieller Anstieg der dynamischen Viskosität beobachtet.

Im Gegensatz dazu zeigt Referenz-Binder 3 keine nennenswerte Zunahme der Viskosität über die Steigerung der Konzentration.

Bei Referenz-Binder 2 ist lediglich eine leichte Erhöhung der Viskosität zu verzeichnen, jedoch nicht in dem Ausmaß wie bei Referenz-Binder 1.

Die sehr unterschiedlichen Verläufe der Viskositäten zeigen, dass sich bereits die Referenzsysteme stark hinsichtlich deren rheologischen Verhaltens unterscheiden.

In Abbildung 5 sind die Viskositäten der Lösungen und Dispersionen der Bio-Binder bei einer Scherrate von 500 s^{-1} dargestellt.

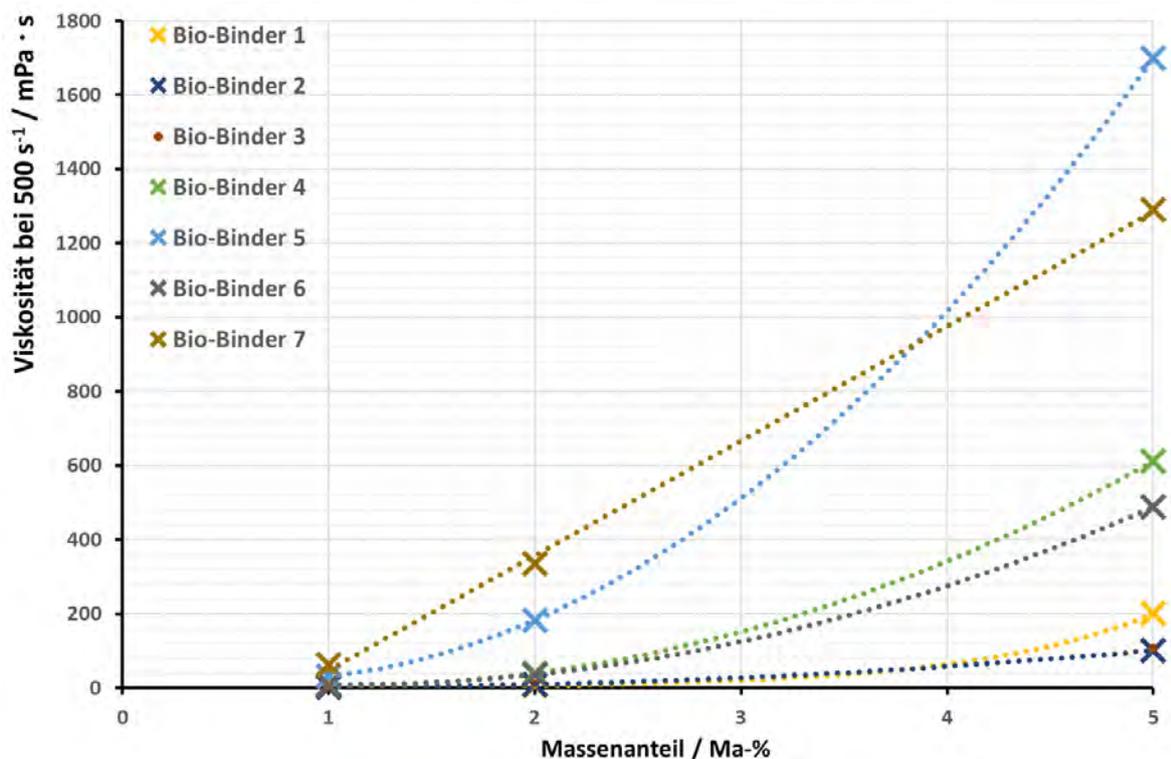


Abbildung 7: Viskositäten der Lösungen und Dispersionen der Bio-Binder bei einer Scherrate von 500 s^{-1} in Abhängigkeit der Konzentration. Bild: Florian Bauer

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die biobasierten Binder im Vergleich zu den Referenzsystemen eine grundlegend höhere Viskosität aufweisen. Diese Eigenschaft könnte den Anwendungsbereich der Bio-Binder stark beschränken, insbesondere in Prozessen, die eine niedrige Viskosität erfordern. Bemerkenswert ist, dass Lösungen/Dispersionen der Bio-Binder 1 und 2 vergleichsweise niedrige Viskositäten aufweisen.

Die Unterschiede in den rheologischen Eigenschaften betonen die Relevanz einer systematischen Auswahl von Bindern für unterschiedliche Einsatzgebiete und verdeutlichen die Bedeutung einer gezielten Formulierung, um gewünschte Viskositätsprofile zu erhalten.

4.2.2 Rheologie der Schlicker

Zusätzlich zu den Untersuchungen an wässrigen Lösungen und Dispersionen der reinen Bindersysteme, wurden die rheologischen Eigenschaften daraus hergestellter Schlicker analysiert. Der Begriff "Schlicker" bezieht sich dabei auf eine wässrige Dispersion von Aluminiumoxid, der sowohl die Binder als auch weitere organische Substanzen wie Dispergiermittel zugesetzt werden. In den hier beschriebenen Experimenten wurden Schlicker-Dispersionen bestehend aus 60 Ma-% Aluminiumoxidpulver,

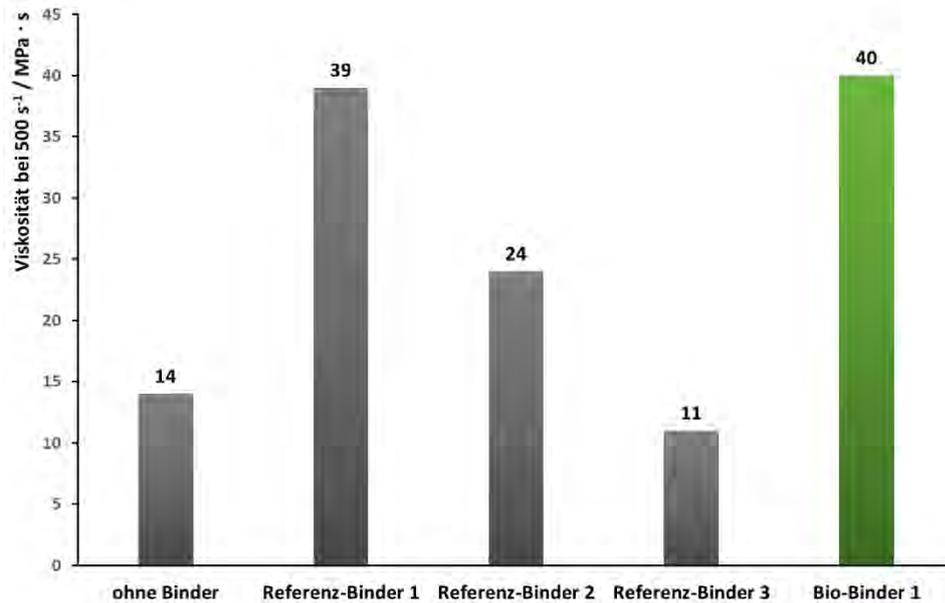


Abbildung 8: Viskositäten der Schlicker bei einer Scherrate von 500 s⁻¹. Bild: Florian Bauer

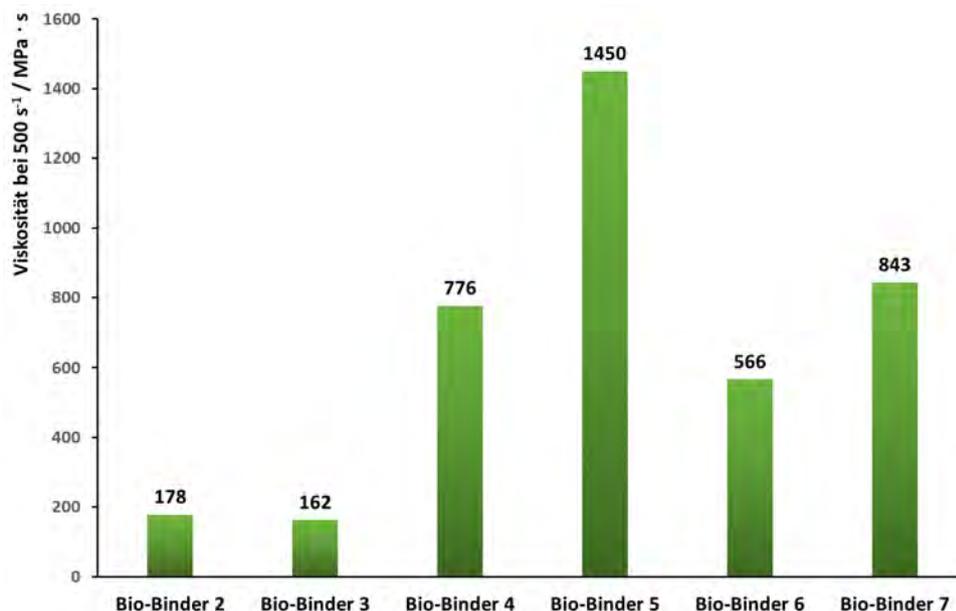


Abbildung 9: Viskositäten der Schlicker bei einer Scherrate von 500 s⁻¹. Bild: Florian Bauer

2 Ma-% Binder und 2 Ma-% Dispergiermittel untersucht. Die Unterschiede in der Viskosität der wässrigen Lösungen und Dispersionen der Bindersysteme spiegeln sich ebenfalls in den Viskositäten der Schlicker wider. Bei den Bio-Bindern 2 bis 7 (siehe Abbildung 9) wurden Viskositäten im Bereich von 162 MPa·s bis 1.450 MPa·s bei einer Scherrate von 500 s⁻¹ gemessen. Im Gegensatz dazu wiesen die Referenz-Binder eine maximale Viskosität von 39 MPa·s auf.

Bemerkenswert ist der gemessene Wert des Bio-Binders 1. Dieser zeigt eine Viskosität von 40 MPa·s und weist damit vergleichbare Eigenschaften wie Referenz-Binder 1 auf. Diese übereinstimmende

Viskosität macht den Bio-Binder 1 besonders interessant als potenziellen Ersatz für die konventionellen Systeme und könnte sich somit als vielversprechende Alternative anbieten, die nicht nur ökologisch vorteilhaft ist, sondern auch in Bezug auf die rheologischen Eigenschaften den etablierten Referenz-Bindern in nichts nachsteht.

4.3 Filmbildungseigenschaft und Gitterschnitttest

Zur Untersuchung der Haftung der Binder auf Aluminiumoxidpartikeln wurden die Filmbildungseigenschaften überprüft. Dazu wurden Lösungen und Dispersionen der Binder in Wasser hergestellt und auf eine Aluminiumoxidkeramikplatte gerakelt und getrocknet. Die entstandenen Polymerfilme wurden mittels eines Skalpells gitterförmig eingeschnitten und mit einem Normklebeband fixiert. Anschließend wurde das Klebeband mit einer Masse von 2 kg für einen Zeitraum von einer Minute belastet und danach abgezogen. Es wurde daraufhin bewertet, ob der Polymerfilm intakt blieb oder ob Teile der Einschnitte mit dem Klebeband entfernt wurden.

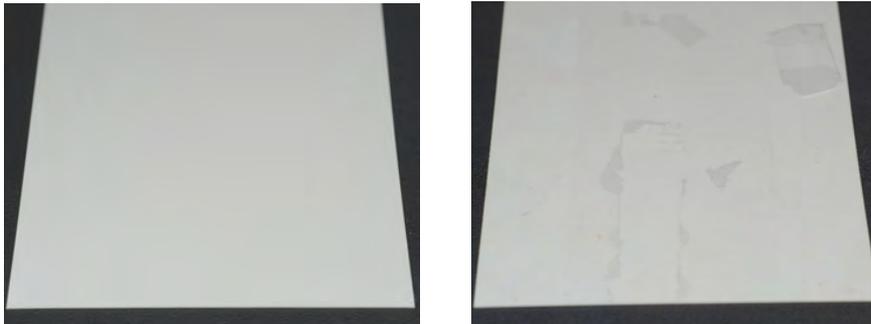


Abbildung 8: Keramikplatte ohne Polymerfilm (links) mit abgezogenem Polymerfilm (rechts). Bild: Florian Bauer

Ein Überblick über die Ergebnisse der Gitterschnitttests ist in der nachfolgenden Tabelle zu finden.

Tabelle 5: Ergebnisse der Gitterschnitttests.

Bindersystem	Ergebnis
Referenz-Binder 1	Film konnte abgezogen werden
Referenz-Binder 2	Film blieb intakt
Bio-Binder 1	Film blieb intakt
Bio-Binder 2	Film konnte abgezogen werden
Bio-Binder 3	Film konnte abgezogen werden
Bio-Binder 4	Film konnte abgezogen werden
Bio-Binder 5	Film konnte abgezogen werden
Bio-Binder 6	Film konnte abgezogen werden
Bio-Binder 7	Es konnte kein Film gebildet werden

Die vorliegenden Resultate verdeutlichen, dass sowohl Referenz-Binder 2 als auch Bio-Binder 1 eine ausgezeichnete Adhäsion auf der Keramikplatte aufweisen. Aus diesem Befund kann eine adäquate Haftung auf den Al_2O_3 -Partikeln angenommen werden.

Für die abschließenden Analysen der Grünkörperfestigkeit wurden gezielt die Referenz-Binder 1 und 2 sowie der Bio-Binder 1 ausgewählt.

Die Wahl des Bio-Binders 1 basierte auf den Resultaten der Viskositätsmessungen und der Bestimmung der Haftungseigenschaften: Bei beiden Experimenten zeigte der Bio-Binder ein ähnliches oder besseres Verhalten als die genannten Referenzsysteme.

4.4 Grünkörperfestigkeit

Die Bezeichnung "Grünkörper" bezieht sich in der Keramikherstellung auf ein Zwischenprodukt oder eine Vorform eines keramischen Werkstücks. Der Grünkörper ist im Wesentlichen das geformte, jedoch noch nicht gesinterte Material. Er wird durch Formgebung, beispielsweise durch Pressen, Gießen oder Extrudieren hergestellt und kann eine Vielzahl von Formen annehmen, je nach den Anforderungen des endgültigen keramischen Produktes.

Der Grünkörper besteht in der Regel aus einer Mischung von keramischen Pulvern, Bindemitteln und gegebenenfalls anderen Zusatzstoffen. Das Bindemittel verleiht dem Grünkörper die notwendige Festigkeit, um die Form während des weiteren Verarbeitungsprozesses zu behalten. Nach der Formgebung wird der Grünkörper in einem nachfolgenden Schritt entbindert, wodurch das Bindemittel entfernt wird, und anschließend gesintert, wodurch sich die keramischen Pulverpartikel miteinander verbinden, um den endgültigen keramischen Körper mit möglichst hoher Festigkeit und Dichte zu bilden.

Für die Überprüfung der Grünkörperfestigkeiten wurden die Referenz-Binder 1 und 2 sowie der Bio-Binder 1 herangezogen. Der Bio-Binder 1 wurde ausgewählt, da er im Haftungstest die besten Ergebnisse zeigte und auch die Viskosität vergleichbar mit den Referenzen war.

Die Festigkeiten wurden durch den Brittle-Ring-Test ermittelt. Der Brittle-Ring-Test ist eine Methode zur Bestimmung der Grünkörperfestigkeit von keramischen Materialien. Diese Testmethode ermöglicht es, die Biegefestigkeit des Grünkörpers zu bestimmen, wodurch Rückschlüsse auf die mechanische Festigkeit des Materials vor dem Sintern gezogen werden können. Dabei werden die Ringe in einer Universalprüfmaschine zwischen zwei Platten gelegt und anschließend zerdrückt.

Zur Probenvorbereitung wurden zunächst die Schlicker aus den Bindern, einem Dispergiermittel und Aluminiumoxid-Pulver angesetzt. Um pressbares Pulver zu erhalten, wurden die Schlicker gefriergetrocknet und anschließend gesiebt. Das erhaltene binderhaltige Pulver wurde zu Ringen verpresst.



Abbildung 119: Grünkörperringe: Referenz-Binder 1 (links), Referenz-Binder 2 (mittig), Bio-Binder 1 (rechts). Bild: Florian Bauer

Für die Ermittlung der Festigkeit wurden jeweils zehn Ringe pro Binderart getestet.

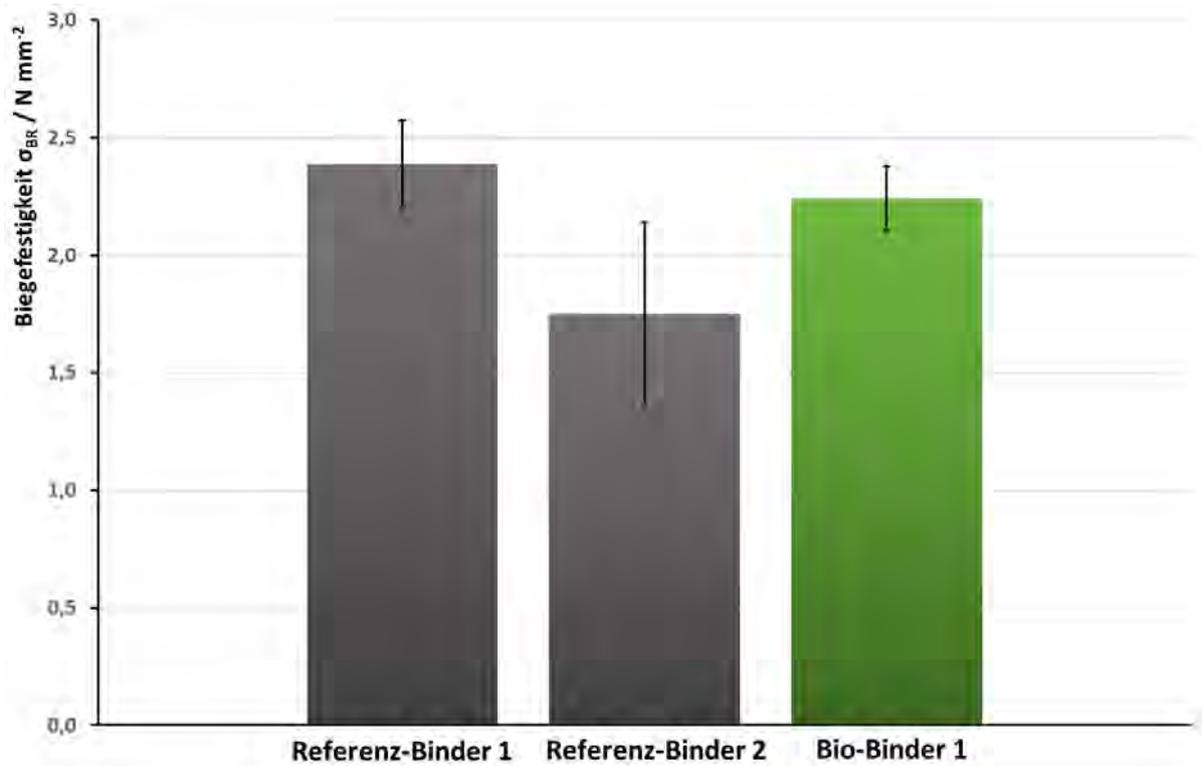


Abbildung 12: Vergleich der Grünkörperfestigkeiten Bild: Florian Bauer

Die Analyse der Biegefestigkeit offenbart, dass der Bio-Binder 1 Ergebnisse von vergleichbarer Qualität wie die Referenz-Binder erzielt. Die Streuung der Messwerte ist beim Bio-Binder sogar am geringsten. Dies deutet darauf hin, dass der hier gefundene biobasierte Binder das Potenzial aufweist, konventionelle erdölbasierte Binder effektiv zu ersetzen.

4.5 Dichtebestimmung und Festigkeitsprüfung der gesinterten Ringe

Im weiteren Verlauf des Projekts wurden zehn der hergestellten Grünkörperlinge einem Sinterprozess unterzogen. Nach dem Sintern erfolgte eine umfassende Charakterisierung der hergestellten Keramikbauteile, wobei besonderes Augenmerk auf die Dichteigenschaften sowie die Festigkeiten gelegt wurde.



Abbildung 13: Ringe nach dem Sintern: Referenz-Binder 1 (links), Referenz-Binder 2 (mittig), Bio-Binder 1 (rechts). Bild: Florian Bauer

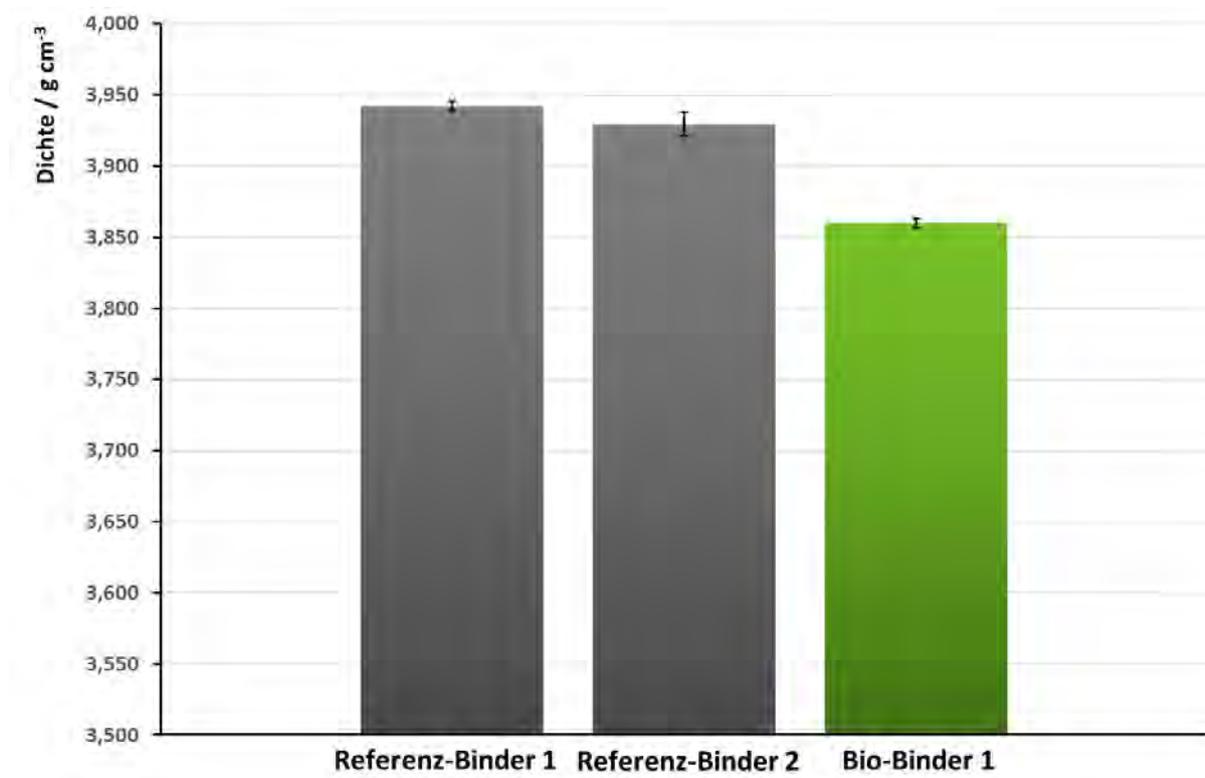


Abbildung 14: Vergleich der Dichten der gesinterten Ringe. Bild: Florian Bauer

Die Dichtemessungen ermöglichten eine Quantifizierung der Materialkompaktheit nach dem Sinterprozess. Die ermittelten Dichtewerte bieten Einblicke in die strukturellen Veränderungen des Materials während des Sinterprozesses und sind von essenzieller Bedeutung für das Verständnis der Materialverdichtung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ringe, deren Grünkörper mithilfe des Bio-Binders hergestellt wurden, eine etwas geringere Dichte aufweisen als die der Referenz-Binder. Die Dichte verringert sich vom Referenz-Binder 1 zum Bio-Binder 1 um 2 %.

Zusätzlich wurden Festigkeitsmessungen an den gesinterten Keramiken – wie schon bei den Grünkörpern – mittels Brittle-Ring-Tests durchgeführt.



Abbildung 15: Ringe vor (links) und nach (rechts) dem Sintern. Bild: Florian Bauer

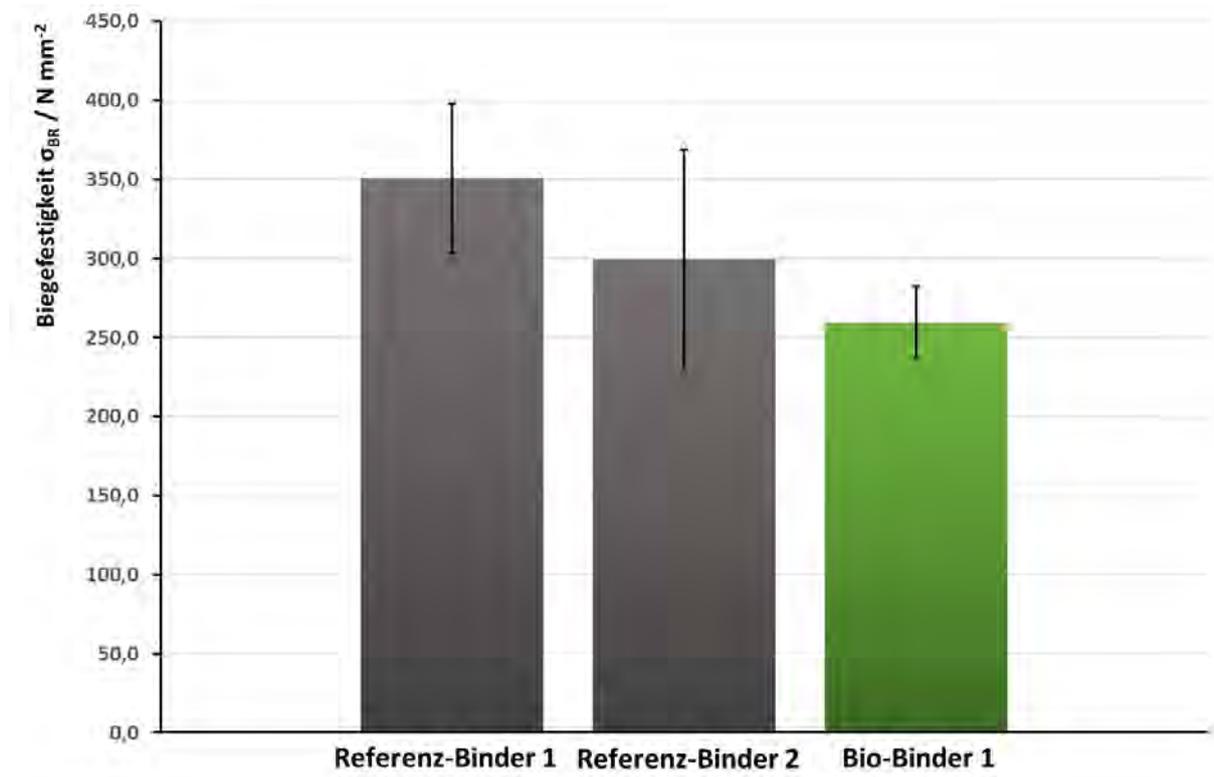


Abbildung 16: Vergleich der Festigkeiten der gesinterten Ringe. Bild: Florian Bauer

Bei den Festigkeiten der gesinterten Ringe ist eine Verringerung der Festigkeit von 25 % vom Referenz-Binder 1 zum Bio-Binder 1 festzustellen. Die Streuung fällt beim Bio-Binder hingegen am geringsten aus.

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

In diesem Vorhaben wurde aufgrund seiner Interdisziplinarität die Zusammenarbeit zwischen den Fakultäten Angewandte Chemie und Werkstofftechnik gefördert. Die in diesem Vorlaufforschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse dienen als Basis für eine vertiefte Kooperation der Lehr- und Forschungsgebiete Makromolekulare Chemie und Kunststofftechnik sowie Hochleistungskeramiken ebenso wie für die Beantragung weiterer Fördermittel und die Akquise direkter Drittmittel aus der Industrie.

Das gesetzte Gesamtziel der Kooperation zwischen den Lehr- und Forschungsgebieten aus den Fakultäten Angewandte Chemie und Werkstofftechnik ist der Einsatz biobasierter Bindersysteme für Hochleistungskeramiken. Der Einsatz von Bio-Bindern führt zur Reduktion der Emission von Treibhausgasen.

Als Ergebnis der Vorlaufforschung REnuka sollte eine Machbarkeit des gesetzten Zieles gezeigt werden. Darüber hinaus war die Aufgabe, einfache Messverfahren zu finden, mit denen vor aufwendiger Herstellung von Grünkörpern und dem sogenannten Brittle-Ring-Test Aussagen zu einem möglichen Einsatz neuer Binder getroffen werden können.

In Bezug auf die untersuchten Aspekte – Zersetzungsrückstand, Viskosität, Haftung und Grünkörperfestigkeit – zeigte insbesondere Bio-Binder 1 vielversprechende Resultate. Die Zersetzungseigenschaften des Bio-Binders 1 sind vergleichbar mit den Referenz-Bindern, was auf eine potenzielle Anwendung in der keramischen Produktion hindeutet. Die Viskosität der wässrigen Dispersion des Bio-Binders 1 ist noch niedrig genug, um bei der Verarbeitbarkeit und Formgebung der Grünkörper keinen signifikant negativen Einfluss zu haben.

In Bezug auf die Haftung auf Keramikplatten präsentiert sich Bio-Binder 1 als äußerst vielversprechend vergleichbar mit den Referenzbindern. Diese herausragende Haftung könnte sich positiv auf die Zusammenstellung von keramischen Komponenten auswirken und die Gesamtstabilität verbessern. Durch den Gitterschnitttest konnte hier ein einfaches Messverfahren gefunden werden, um bereits vor der aufwendigen Herstellung von Grünkörpern Aussagen zu einem möglichen Einsatz neuer Binder zu treffen.

Hinsichtlich der Grünkörperfestigkeit erweist sich Bio-Binder 1 als äquivalent zu den Referenz-Bindern. Dieses Ergebnis ist von besonderer Bedeutung, da es darauf hinweist, dass der Bio-Binder nicht nur in Bezug auf die Verarbeitungseigenschaften, sondern auch bezüglich der mechanischen Festigkeit mit den etablierten Systemen vergleichbar ist.

Bei den Dichten der gesinterten Ringe sowie deren Festigkeit weist Bio-Binder 1 jedoch noch Verbesserungspotenzial auf. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass es hier noch weiteren Entwicklungsbedarf gibt, um das gesetzte Gesamtziel zu erreichen.

Zusammenfassend lassen die umfassenden Ergebnisse darauf schließen, dass Bio-Binder 1 als vielversprechendes und nachhaltiges Alternativmaterial in der Herstellung von Hochleistungskeramiken betrachtet werden kann, da dieses Bindemittel vergleichbare Grünkörperfestigkeiten wie die Referenz-Binder erzielt. Die Eigenschaften der gesinterten Ringe können jedoch noch nicht mit denen der Referenzen mithalten. Folglich ist vor industriellem Einsatz eine weiterführende Erforschung und Entwicklung des Bio-Binders 1 notwendig.

Dies ist Aufgabe anschließender Projekte. Da bisher nur eine kleine Auswahl an Klassen von Bio-Bindern untersucht wurde, sollten in weiteren Experimenten auch bisher nicht getestete Varianten genauer analysiert werden. Das in diesem Projekt erzielte Ergebnis ermutigt, dass sich Bio-Binder finden lassen, die den konventionellen Bindern ebenbürtig sein können.

Zugang zu wohnungslosen Migrant*innen (ZuWoMi)

Projektleitung:

Prof. Dr. Frank Sowa

Fakultät Sozialwissenschaften

Dr. Anna Xymena Tissot

Fakultät Sozialwissenschaften

Studentische Projektmitarbeitende

Natasha Crickmore, Bachelorstudiengang Soziale Arbeit (B. A.)

Fakultät Sozialwissenschaften

Lana Lamsfuß, Masterstudiengang Soziale Arbeit (M. A.)

Fakultät Sozialwissenschaften

Denis Nesklada, Bachelorstudiengang Soziale Arbeit (B. A.)

Fakultät Sozialwissenschaften

Lukas Rosenthal, Bachelorstudiengang Soziale Arbeit (B. A.)

Fakultät Sozialwissenschaften

Zusammenfassung:

Migrantinnen und Migranten sind überproportional häufig von Armut betroffen, doch Wohnungslosigkeit ist bei dieser Zielgruppe bisher wenig erforscht. Aufgrund intersektionaler Benachteiligungen kann sie als schwer erreichbar angesehen werden, was eine sozialwissenschaftliche Forschung in diesem Feld erschwert.

Daher erprobt und bewertet das Projekt ZuWoMi niedrighschwellige Zugangsmöglichkeiten zur Zielgruppe. Es zeigte sich, dass ethnografische Ansätze und die Kontaktherstellung über Gate Keeper den Zugang zur Zielgruppe erleichtern können. Mittels Kurzbefragungen kann zudem verdeutlicht werden, dass der Sprache ein besonderer Stellenwert zukommt.

Insgesamt ist zu konstatieren, dass aktiv teilnehmende Beobachtungen über einen längeren Zeitraum benötigt werden, um eine authentische Vertrauensbasis zu schaffen.

1 Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät	Sozialwissenschaften
Projektleitung	Prof. Dr. Frank Sowa, Dr. Anna Xymena Tissot
Projektteam	Natasha Crickmore, Lana Lamsfuß, Denis Nesklada, Lukas Rosenthal
Kontaktdaten	frank.sowa@th-nuernberg.de
Projektleitung	annaxymena.tissot@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Wohnungslosigkeit ist mittlerweile als ein gesellschaftliches Schlüsselproblem erkannt worden. Als biographisch prekäre Lebenssituation geht sie mit einem chronischen Mangel an ökonomischen, kulturellen und sozialen Ressourcen einher (TSIRIKIOTIS/SOWA 2022). Das Leben ohne Wohnung erscheint als nicht-konformes, abweichendes Verhalten, das als Rückzug aus der bürgerlichen Gesellschaft wahrgenommen wird und entsprechend einen Bedeutungsverlust von allgemein anerkannten bürgerlichen Werten und Normen impliziert (BECKER 2014; MERTON 1995).

In Folge des russischen Angriffskriegs in der Ukraine und der damit einhergehenden Steigerung der Energiekosten erhöht sich die Gefahr, dass Haushalte die Grenzen der finanziellen Leistungsfähigkeit überschreiten und eine erhebliche Zahl von Menschen in Deutschland in Wohnungsnot gerät oder wohnungslos wird. Miet- und Energieschulden sind schon lange in Verkettung mit anderen Faktoren der häufigste Auslöser für den Verlust der Wohnung (BAG W 2022). Wie sowohl aus der sozialen Ungleichheits- als auch aus der Migrationsforschung bereits bekannt ist, sind Migrantinnen und Migranten überproportional von Armut betroffen (GIESECKE ET AL. 2017). Die aktuelle Hochrechnung der Bundesarbeitsgemeinschaft Wohnungslosenhilfe e.V. (BAG W 2023) zeigt, dass im Jahre 2022 mindestens 607.000 Menschen wohnungslos waren. Migrantinnen und Migranten sind statistisch gesehen besonders stark von Wohnungslosigkeit betroffen. Laut den veröffentlichten Zahlen waren von den 607.000 Betroffenen 411.000 Menschen ohne deutsche Staatsangehörigkeit (EBD.: 6). Bei den wohnungslosen Menschen mit deutscher Staatsbürgerschaft ergibt sich zu den Zahlen aus dem Vorjahr ein Anstieg von 5 Prozent, wohingegen sich der Anteil von wohnungslosen Menschen ohne deutsche Staatsbürgerschaft um 118 Prozent erhöht hat (EBD.: 1).

Insgesamt ist die statistische Erfassung von Wohnungslosigkeit äußerst komplex: Betroffene Personen befinden sich nur teilweise in statistisch auswertbarem Verhältnis zur Sozialverwaltung, und die Erfassung von Unterbringungszahlen liegt in kommunaler Zuständigkeit (BMAS 2022: 19FF.). Tendenziell kann von einer hohen Dunkelziffer ausgegangen werden. So ist es nicht verwunderlich, dass es nun auf internationaler Ebene Bestrebungen gibt, eine Debatte darüber zu initiieren, welche spezifischen Gruppen von wohnungslosen Personen in den Wohnungslosenstatistiken aufgeführt werden sollten (HERMANS ET AL. 2020).

Fehlender Leistungsanspruch auf Wohnungslosenhilfe kann als ein Grund für die überproportionale Zahl an wohnungslosen Menschen ohne deutsche Staatsbürgerschaft gesehen werden. Aufgrund des dreigliedrigen Systems der Existenzsicherung (SGB II, SGB XII UND ASYLBLG) werden für Personen ohne deutsche Staatsangehörigkeit Ausgrenzungen in Bezug auf Unterstützungsleistungen zur Bewältigung

von Wohnungslosigkeit geschaffen (FRINGS 2018: 159). Menschen ohne dauerhaften Aufenthaltsstatus wird der Zugang zu Hilfen in Teilen verwehrt, obwohl sie Anspruch auf diese haben (EBD.: 159FF.). Dies kann bei den Betroffenen wiederum zu einem Ausbleiben von Hilfe in akuten Notlagen führen. Wie sozialwissenschaftliche Biografieforschung zeigt, sind wohnungslose Migrantinnen und Migranten von Prozessen und Systemen tiefgreifender sozialer Ausgrenzung betroffen: Ihr zugeschriebener Status als Migrantin und ihre soziale Stellung als Person, die Wohnungslosigkeit erlebt, führen dazu, dass wohnungslose Migrantinnen und Migranten mit unterschiedlichen Formen der Kriminalisierung konfrontiert werden (SERPA 2023).

Der Begriff der *crimmigration* verdeutlicht, dass durch gesellschaftliche Konstruktionen ein feindseliges Umfeld für wohnungslose Migrantinnen und Migranten geschaffen wird, in dem zunehmend Ideen, Methoden und Wahrnehmungen des Strafrechtssystems dominieren).

Längst ist Migration als gesellschaftsrelevantes Phänomen in breiten wissenschaftlichen und öffentlichen Diskursen erkannt worden. Umso überraschender ist es, dass die Verknüpfung des sozialen Phänomens Wohnungslosigkeit mit der Kategorie *Migrationshintergrund* (als lebensweltlichen Bezug) in der deutschen Forschungslandschaft immer noch eher die Ausnahme bildet. Insgesamt liegen bisher nur überschaubare Erkenntnisse zur Wohnungslosigkeit bei Migrantinnen und Migranten vor, jedoch sind diese häufig an ein institutionelles (vor allem sozialarbeiterisches) Setting geknüpft (VGL. CHWISTEK 2013; DÖBRICH/HUND 2022; GRAßHOFF/GROSU/MANAVSKA/REICHENBACH 2016; HAJ AHMAD 2022A; REICHENBACH 2018). Dadurch werden nicht an das Hilffsystem angebundene Menschen selektiv ausgeschlossen (Creaming-Effekt). Folglich gibt es zu vielen migrantischen Personengruppen bisher kaum Forschungsergebnisse.

Wohnungslose migrantische Frauen sind beispielsweise im aktuellen Forschungsdiskurs unterrepräsentiert. Es liegen insgesamt nur vereinzelte ethnographische Studien vor (HAJ AHMAD 2022B; KHOSRAVI 2010), welche die Schnittstelle von Migration und Wohnungslosigkeit beleuchten. Doch qualitative Studien, die Migration und Wohnungslosigkeit aus einer intersektionalen Perspektive untersuchen, fehlen bislang vollständig. Diesem Forschungsdesiderat soll – beginnend mit den Ergebnissen der Vorlauforschung – zielorientiert und nachhaltig begegnet werden.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Das Forschungsvorhaben eruiert in Form einer Machbarkeitsstudie, wie die äußerst vulnerable und schwer auffindbare Gruppe von wohnungslosen Migrantinnen und Migranten erreicht und für die Teilnahme an einem Forschungsprojekt gewonnen werden kann. Diese Erkenntnisse und Vorarbeiten der Vorlauftorschung sind essenziell für die Beantragung eines größeren Drittmittelprojekts, da sie die Höhe der beantragten Fördermittel für den Feldzugang (Kontaktanbahnung) beeinflussen und zudem bereits erfolgreich erprobte Wege ins Feld dokumentieren. Die ersten inhaltlichen Erkenntnisse beleuchten die Heterogenität und Komplexität des Phänomens und sollen im Drittmittelantrag dazu genutzt werden, ein passgenaues Forschungsdesign zu konzipieren.

Im ZuWoMi-Forschungsprojekt wurden daher drei Hauptziele verfolgt:

1. In erster Linie sollte mittels eines ethnographischen Ansatzes anhand teilnehmender Beobachtungen sowie der Kontaktaufnahme mit Gate Keepern der Zugang zu der Zielgruppe im Sinne qualitativer Feldforschung erprobt und etabliert werden. Dadurch konnten Kurzbefragungen und ergänzende (Expertinnen und Experten-)Interviews sowie ein Interview mit einer betroffenen Migrantin realisiert werden.
2. In einer Methodenreflektion sollten die unterschiedlichen Zugänge und Wege der Kontakt-herstellung sowie die Anwendung verschiedener qualitativer Forschungs- und Sampling-Ansätze

reflektiert werden, die im Anschluss zu einer Bewertung der Erprobungsmethoden führte. Zudem sollten die ersten inhaltlichen Erkenntnisse über die Heterogenität und Komplexität des Themenkomplexes Wohnungslosigkeit und Migration sowie über weitere, dafür relevante intersektionale Verwobenheiten anderer relevanter Dimensionen sozialer Ungleichheit oder Differenzkategorien (wie zum Beispiel Alter, Geschlecht, Gesundheit) genutzt werden, um ein Forschungsdesign zu konzipieren, das einer verstehenden, kultursensiblen und partizipativen Sozialforschung über und mit wohnungslosen Migrantinnen und Migranten gerecht wird.

3. Durch eine Kontaktherstellung und das Aufsuchen von Gate Keepern sowie den durchgeführten Expertinnen und Experten-Interviews (zum Beispiel mit Akteurinnen und Akteuren der Wohnungslosenhilfe und/oder der Migrations-/Integrationsarbeit) an den Untersuchungsorten Nürnberg und Berlin sollte ein erster Austausch mit Praktikerinnen und Praktikern im Sinne eines Praxis-Transfers stattfinden, der eine Sensibilisierung und Vertiefung des Problembewusstseins ermöglichte sowie die Erforschung weiterführender (gegebenenfalls bisher unbekannter) Erkenntnisse zum Thema aus der Praxis.

Das Projekt ZuWoMi wurde als studentisches Forschungsprojekt umgesetzt: So bestand das Team aus zwei erfahrenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und vier Studierenden. Eine der Studierenden befand sich während der Laufzeit des Projektes im Masterstudiengang Soziale Arbeit (M.A.), drei im Bachelorstudiengang Soziale Arbeit (B.A.). Letztere hatten das Modul *Soziale Arbeit in der Migrationsgesellschaft* besucht und dadurch großes Interesse am Themenfeld geäußert. Auch wenn das studentische Forschungsprojekt an keine konkrete Lehrveranstaltung angebunden war, entsprach es weitestgehend den Prinzipien von Lehrforschungsprojekten (SOWA 2018; SOWA/ZITZMANN 2020):

Das studentische Forschungsteam bildete den Mittelpunkt des Forschungshandelns, und Studierende wurden mit Hilfe von Schulungen, fachlicher Begleitung, Coaching und Austausch in die Lage versetzt, alle Phasen des Forschungsprozesses praktisch, intensiv und selbstverantwortlich zu erleben und erste eigene Forschungserfahrungen zu sammeln (SOWA 2020).

4 Forschungsdesign und methodisches Vorgehen

Das Forschungsdesign ist durch eine Daten-Triangulation (FLICK 2011) gekennzeichnet, die aus unterschiedlichen, ineinander verwobenen Samplings resultierte. Das Vorgehen wurde folgendermaßen angelegt und in nachstehender Reihenfolge konzipiert und umgesetzt:

- Aufarbeiten relevanter Literatur und des Forschungsstandes zu Wohnungslosigkeit und Migration, um Wissen über die Situationen sowie die Aufenthaltsorte zu gewinnen.
- Herstellung des Feldzugangs: Es wurden unterschiedliche Wege im Feld getestet und bewertet, welche Wege funktionierten, um mit der Zielgruppe in Kontakt zu treten (Identifikation relevanter Institutionen, und Akteurinnen und Akteuren, Analyse der (migrationsbedingten) Gegebenheiten).
- Ethnographische Beobachtungen: Die Beobachtungen erfolgten dabei sowohl als aktive als auch passive, teilnehmende Beobachtung. So kann der Partizipationsgrad der Forschenden am Geschehen sehr unterschiedlich sein und zwischen einem starken Involviertsein (aktiv) und einem ausschließlichen Beobachten (passiv) wechseln (SOWA/STAPLES/THEUER/ALTHAUS 2013). Insgesamt wurden sieben teilnehmende Beobachtungen durchgeführt, drei in Nürnberg und vier in Berlin. Sechs der Beobachtungen wurden als passiv teilnehmende Beobachtung erhoben, eine Beobachtung konnte zum Zwecke des Kontrastes als aktiv teilnehmende Beobachtung durchgeführt werden. Diese Methode der ethnografischen Erkundung erlaubte es, ein insgesamt besseres Verständnis des Sozialraums und teilweise der Lebenswelt der Zielgruppe zu entwickeln. Durch diesen Perspektivwechsel erfolgten neue Einblicke in eine fremde Lebenswelt, die Außenstehende nicht erfahren werden können (GIRTLE 1989: 109F.; 2004).

- Kurzbefragungen: Anhand neun qualitativer Kurzbefragungen wurden angetroffene Migrantinnen und Migranten gefragt, welche Bedingungen erfüllt sein müssten, damit sie über ihr Leben und ihren Alltag in einem qualitativen, narrativen Interview im Folgeprojekt erzählen würden (zum Beispiel Muttersprache, Geschlecht, Identifikation (anderer) relevanter sozialer und interkultureller Kompetenzen, unter anderem durch gezielte Fragen nach der Einschätzung von Sprach- und Kulturermittelnde).
- Qualitative (Expertinnen und Experten-)Interviews: Es wurden insgesamt acht leitfadengestützte (Expertinnen und Experten-)Interviews im Laufe der Feldforschung in Nürnberg und Berlin durchgeführt. Das Sampling besteht aus Personen, die von Wohnungslosigkeit betroffen sind oder waren, sowie Fachkräften, die in diesem Bereich arbeiten und entsprechend als Expertinnen und Experten institutioneller Hilfsangebote angesehen werden können. Im Rahmen der Interviews kommt der zwanglose, natürliche Gesprächsführung, die den Befragten Gehör schenkt, ein hoher Stellenwert zu (HÄDER 2019: 277), die durch die Gewährleistung einer großen Offenheit, unter anderem die Narration einer individuellen Biografie und Lebensgeschichte ermöglicht (HELFFERICH 2011: 179). Die Erkenntnisse, die durch die qualitativen Interviews erworben wurden, konnten als Hintergrundwissen im weiteren Forschungsprozess genutzt werden.
- Die Analyse des erhobenen empirischen Materials erfolgte durch eine Kombination des klassischen offenen Kodierens (GLASER/STRAUSS 1998) mit verschiedenen anderen Auswertungsverfahren wie Inhaltsanalyse (Mayring 2008) und Sequenzanalyse (WERNET 2009). So wurden Beobachtungsprotokolle beispielsweise an Sequenzen und Stellen intensiver interpretiert, an denen es um die Identifikation oder Wahrnehmung der beobachteten Person als Angehörige der Zielgruppe ging.

Die Feldforschung begann im Frühjahr 2023 in Nürnberg und fand ihren Höhepunkt in einem Forschungsaufenthalt in Berlin, womit sie gleichzeitig endete. Berlin wurde in das Untersuchungsdesign aufgenommen, weil es mit einer Größe von 3.866.385 Einwohnenden (AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG 2023) als Kontrastfall zu Bayerns zweitgrößter Stadt Nürnberg mit einer Bevölkerung von 542.544 Menschen (STADT NÜRNBERG – AMT FÜR STADTFORSCHUNG UND STATISTIK 2022) diene. Als Hauptstadt und Ballungszentrum ist Berlin zudem ein beliebtes Zuwanderungsziel, was wiederum Anlass zu einer kritischen Überprüfung gab, in welchem Ausmaß wohnungslose Migrantinnen und Migranten in der Hauptstadt präsent sind beziehungsweise als präsent wahrgenommen werden (und so eventuell ein Kontrast zu Nürnberg bilden).

5 Forschungsergebnisse: Analyse und Herausforderungen der Zugänge

Die erprobten Zugangsformen variierten in ihrer Form und wurden im Verlauf der Zeit durch erste Auswertungsschritte sukzessive ausdifferenziert und aufeinander abgestimmt (SIEHE ABBILDUNG 1: ERPROBTE ZUGANGSFORMEN). So stellte die Methodologie der Grounded Theory nach Strauss und Glaser (1998) die erkenntnistheoretische Grundlage dieser Forschungsarbeit dar.

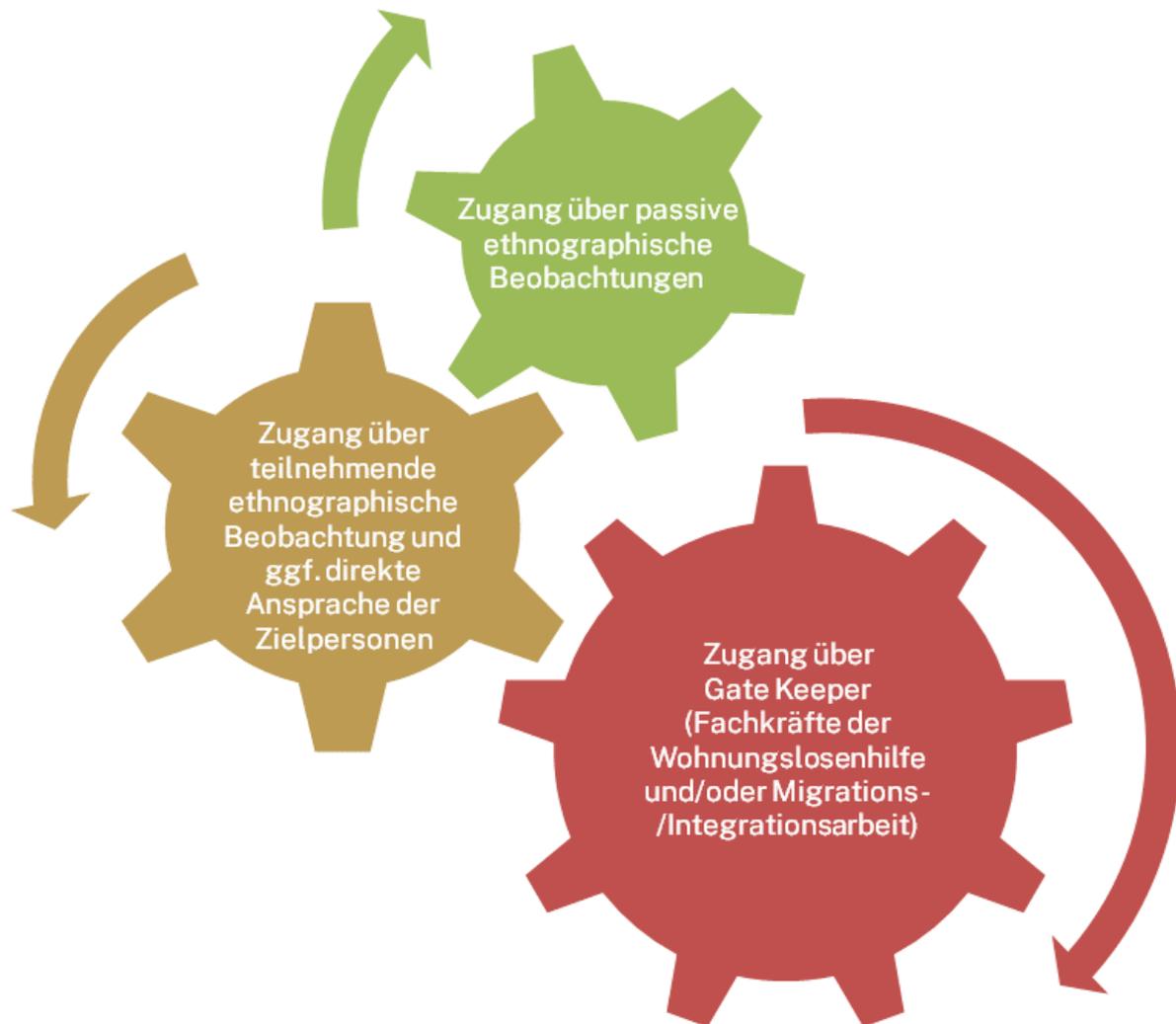


Abbildung 1: Erprobte Zugangsformen. Bild: Frank Sowa

Zugänge im öffentlichen Raum

In großen Teilen wurde der Zugang zur Zielgruppe über den öffentlichen Raum geschaffen, um die Personen der Zielgruppe antreffen zu können, die nicht an institutionelle Hilfsangebote der Wohnungslosenhilfe oder der Migrations-/Integrationsarbeit angebunden sind. Dabei sind die ersten Zugänge mit Hilfe der Methode der passiven teilnehmenden Beobachtung erfolgt. Bei diesen Beobachtungen wurde das Geschehene über einen längeren Zeitraum mitverfolgt, ohne jedoch in direkte Interaktion mit den Subjekten und Beobachtungssituationen zu treten. Trotzdem ist anzunehmen, dass bereits die eigene Präsenz im öffentlichen Raum einen Einfluss auf das beobachtete Umfeld hat. Die Beobachtungen wurden in Protokollen umfänglich verschriftlicht und als Grundlage für erste Analysen genutzt, um weitere Zugangsformen zu erschließen. Da die teilnehmende Beobachtung in der Ausarbeitung viele detaillierte Einblicke gibt und Nuancen hervorhebt, konnten in den darauffolgenden Auswertungen der

Beobachtungsprotokolle Rückschlüsse gezogen werden, die wiederum den Zugang über die Kurzbefragungen erleichtern würden.

Die Kurzbefragungen mit wohnungslosen Migrantinnen und Migranten wurden zum Teil im öffentlichen Raum und zum Teil in Einrichtungen der Wohnungslosenhilfe durchgeführt. Es wurde versucht, der Zielgruppe im öffentlichen Raum zu begegnen, nachdem in Praxis-Transfer-Austauschgesprächen mit Fachkräften vor Ort Plätze und Örtlichkeiten eruiert wurden, an denen das Antreffen der Zielgruppe erwartbar sei. Der Zugang erfolgte daraufhin durch direktes Ansprechen von Personen. Dabei zeigte sich schnell, dass die Identifikation von Personen als wohnungslose Migrantinnen und Migranten ethisch problematisch und grundsätzlich schwer zielgerichtet möglich war. Ethisch problematisch war es, Kategorisierungen anhand äußerlicher Merkmale (wie zum Beispiel Erscheinungsbild, Hautfarbe, Gesundheitszustand) vorzunehmen, da dies die schiere Gefahr von Diskriminierung, Stigmatisierung oder Rassismus beinhaltet. Darüber hinaus war die Ansprache nur wenig zielgerichtet möglich, da zum Beispiel zuerst in einer Interaktionssituation durch genaues Zuhören nachvollzogen werden musste, ob die Personen aufgrund ihrer Sprachkenntnisse zur Zielgruppe gehören könnten.

Zugänge über Gate Keeper

Die Kurzbefragungen in den sozialen Einrichtungen wurden in Zusammenarbeit mit den Fachkräften der entsprechenden Einrichtungen koordiniert und haben im Vergleich zum Zugang über den öffentlichen Raum einschlägige Vorteile. Diese Befragungen erfolgten auf zweierlei Weise. Zum einen wurde die Einrichtung als Ort des Antreffens der Zielgruppe geöffnet. Dadurch wurden etwaige Bedenken hinsichtlich des Eindringens in ihre Privatsphäre abgeschwächt. Diese Art der Kontaktaufnahme ging über die Räumlichkeiten der sozialen Einrichtungen hinaus und wurde ebenfalls bei ehrenamtlichen Essens- oder Kleidungsausgabestellen erprobt. Im Kontext der ehrenamtlichen Arbeit wurden Barrieren gesenkt und der Zugang konnte formlos und nebenbei erfolgen. Zum anderen fungierten die Fachkräfte der Einrichtungen als Gate Keeper, die durch ihre Beziehungsarbeit einen besonderen Kontakt zur Zielgruppe pflegen. Jene Mitarbeitende würden dann in eine vermittelnde Rolle treten und einen Teil ihrer eigenen Vertrauensbasis auf die Forschenden übertragen. Diese Vertrauensgrundlage konnte dazu genutzt werden, um die Erfolgchance der Kontaktaufnahme nahezu zu garantieren, da auf diese Weise große Hürden wie Skepsis und Vorsicht außer Acht gelassen werden konnten, während gleichzeitig der professionelle Rahmen der Einrichtung dem Vorgehen Glaubwürdigkeit verlieh. Erprobt wurde außerdem der Zugang über Incentives. Die Incentives wurden als Aufwandsentschädigung angeboten, um der aufgewendeten Zeit, die die angesprochenen Personen für die Kurzbefragungen aufwenden mussten, gerecht zu werden. Die Aufwandsentschädigungen kamen dabei in verschiedenen Formen zum Tragen, zum Beispiel durch Gutscheine für den Supermarkt oder Drogerien oder in Form von Zigaretten. Aus den Kurzbefragungen ging hervor, dass einzelne Gutscheine als einschränkend in Bezug auf die Möglichkeiten, das Geld zu verwerten wahrgenommen würden. Zigaretten für rauchende Menschen haben sich als eine gute Möglichkeit erwiesen, um in zwanglose Gespräche treten zu können. Da die Kurzbefragungen informell und niedrigschwellig erfolgten, wurde auf das Aufzeichnen der Gespräche verzichtet und stattdessen mit Notizen gearbeitet. Bezüglich beider Zugänge traten Bedenken über die Wahrung der Privatsphäre von Menschen auf, die sich den öffentlichen Raum aneignen.

Zugänge mit und über Peers

In den Expertinnen und Experten-Interviews mit den Fachkräften wurde von ihnen der Zugang über die PeerForschung thematisiert. Diese Methode könnte sich für die Erforschung der Zielgruppe von wohnungslosen Migrantinnen und Migranten als äußerst ergiebig erweisen. Hierbei würde die Zielgruppe als sogenannte Peers direkt in die Forschung eingebunden werden und folglich als Bindeglied zu einer sehr niedrigschwelligen Kontaktaufnahme fungieren. Auch hier wäre es vor allem das Vertrauen, das zuvor verschlossene Wege möglicherweise öffnen könnte. Des Weiteren könnte die

Zusammenarbeit mit Peers, die über zusätzliche relevante Sprachkenntnisse verfügen, Kommunikationsmöglichkeiten schaffen, die ohne den Einbezug von Sprachermittelnden nicht realisierbar wären. Der Zugang über Peer-Forschende konnte jedoch nicht erprobt werden, da die Einarbeitung und Koordinierung dieser Personen Ressourcen beanspruchen würde, die dem Vorhaben nicht zur Verfügung standen – als Vorgehen in einem weiteren, auf mehrere Jahre angelegten Forschungsprojekt jedoch sehr wertvoll erscheinen.

Kritische Methodenreflektion der erfolgten Zugangswege und Kurzbefragungen

Die Herausforderungen der erforschten Zugänge sind in ihrer Ausprägungsform alle eng mit der Tatsache verbunden, dass die erforschte Zielgruppe als *hidden and hard-to-reach* (ATKINSON/FLINT 2001) verstanden werden kann und als eine vulnerable und marginalisierte Gruppe gilt. Daher ist das **mangelnde Vertrauen** fremden Personen gegenüber, beziehungsweise das erforderliche Überwinden der Skepsis, die unter der Zielgruppe vorherrscht, eine grundsätzliche Hürde, die es zu überwinden gilt (HEINZELMANN/DOMES/GHANEM/SOWA 2023). Wie bereits erwähnt, stellt das Identifizieren der Zielgruppe eine enorme Schwierigkeit dar, besonders wenn passiv teilnehmend beobachtet wird, weil damit **ethische Bedenken** einhergehen. Das Aufsuchen und Ansprechen von als wohnungslos sowie als Migrantinnen und Migranten gelesenen Personen über den persönlichen und subjektiven Blick erfordert ein Denken in Betrachtungsweisen, die Stereotype (und damit problematische) Darstellungen und Bilder der bereits schon stigmatisierten Personengruppe reproduzieren. Weiterhin führte das oben genannte **Eindringen in die Privatsphäre** der angesprochenen Personen zu Fragen hinsichtlich eines übergriffigen Verhaltens. Wenn eine Person im öffentlichen Raum sitzt oder übernachtet, hat sie dennoch ein Verständnis von einem persönlichen oder privaten Raum. Ein ungefragtes Eindringen in diesen subjektiv gedeuteten Raum könnte eine Grenzüberschreitung bedeuten. Auch dies erscheint in der Methodenreflektion ethisch bedenklich. Über diese Bedenken hinaus wirkten die wohnungslosen Migrantinnen und Migranten **aufgrund der direkten Ansprache eher (sehr) reserviert** und teilweise irritiert, da sie vermutlich häufig (unter Umständen täglich) andere Menschen/Passanten im öffentlichen Raum ansprechen, um nach Geld oder etwaigen Hilfen zu fragen, von diesen aber zumeist ignoriert oder gar nicht wahrgenommen werden. Dass dann (forschende) Personen zielgerichtet auf sie zusteuern, um ihre Zeit zu beanspruchen und Fragen zu stellen, wirkte vor dem Hintergrund der ungewohnten Situation einschüchternd, worauf sich viele eher verschlossen zeigten und so eine positive Interaktion schwer realisierbar war.

Für die **Kurzbefragungen** wurde ein Leitfaden ausgearbeitet, der sich selbst nach Anpassungen durch Felderprobungen, als zu **hochschwellig** erwiesen hat. Menschen, die im öffentlichen Raum angesprochen wurden, haben oft Schwierigkeiten gehabt an einem halbstrukturierten Interview oder gesteuerten Gespräch teilzunehmen. Eine formlosere, offenere und niedrighochschwelligere Herangehensweise erwies sich als ergiebig, jedoch auch nur bis zur teils unüberwindbaren Schwelle der Sprachbarriere. Wohnungslose Migrantinnen und Migranten, die aufgrund intersektionaler Benachteiligungen multiplen Problemlagen ausgesetzt sind und komplexe Bedürfnisse aufweisen, verfügen häufig nicht über ausreichende Sprachkenntnisse des Deutschen (oder Englischen), um in einem spontanen, halboffenen Gesprächsrahmen über abstrakte Situationen zu berichten und schwer nachvollziehbare, unverständliche oder hypothetische Fragen zu beantworten, wie zum Beispiel die Frage „Unter welchen Bedingungen würden Sie an einer Forschung teilnehmen?“. Die Fragetechniken wurden daher angepasst, so dass keine unklaren, schwer verständlichen, überladenen und suggestiven Fragen gestellt wurden (HOPF 1978).

Aus der kritischen Methodenreflektion ergeben sich im Wesentlichen drei zentrale Erkenntnisse:

1. Erfolgversprechend und forschungspragmatisch ist der Zugang zur Zielgruppe über Gate Keeper, da er sich weniger zeit- und beziehungsintensiv gestaltet und von der bereits etablierten Vertrauensbeziehung der Fachkraft profitiert. Dieser Zugang geht allerdings mit dem wesentlichen selektiven Nachteil einher, dass nur diejenigen Personen aufgefunden werden, die entsprechende Hilfsangebote annehmen beziehungsweise entsprechende gesetzliche Ansprüche darauf haben (sogenannter Creaming-Effekt).
2. Für die Erforschung solcher Personen, die keine institutionellen Hilfsangebote in Anspruch nehmen, eignet sich ein ethnographisches Vorgehen, das durch eine andauernde und regelmäßige Präsenz der Forschenden in der Lebenswelt der wohnungslosen Migrantinnen und Migranten charakterisiert ist. Das Schaffen einer authentischen Vertrauensbasis ist dabei der bedeutendste Gelingensfaktor, um Zugänge zu schaffen, wertvolle und rare Daten erheben zu können als auch Creaming-Effekte wirksam zu verringern oder zu vermeiden. Kurze passive teilnehmende Beobachtungen sind dafür im Ergebnis nicht ausreichend. Vielmehr bedarf es eines Eintauchens in das Feld beziehungsweise eines ‚Miterleben‘ des fremden Handelns“ (GIRTLE 1992: 21) durch aktive teilnehmende Beobachtungen über einen längeren Zeitraum.
3. Aufgrund der Hochschwelligkeit der Kurzbefragung kann resümiert werden, dass auf diese verzichtet werden kann. Stattdessen erscheint das Führen erster qualitativer Interviews erfolgversprechender, indem durch offene und immanente Fragen ähnliche Informationen oder Einschätzungen in Erfahrung gebracht werden können. Hierfür müssen allerdings bestimmte Bedingungen erfüllt sein, wie zum Beispiel der Umgang mit eventuellen Sprachbarrieren (Dolmetscherinnen und Dolmetscher, Sprach- und Kulturermittelnde unter Umständen im Forschungsteam), das Bereitstellen von Incentives sowie ein Mindestmaß an Basisvertrauen.

6 Nachhaltigkeit und Verwertung

Die Ergebnisse von ZuWoMi stellen eine Bereicherung für den sozialwissenschaftlichen und methodischen Diskurs da, weil intersektional ausgerichtete, qualitative Forschungen, die das soziale Phänomen Wohnungslosigkeit und die Kategorisierung *Migrantinnen und Migranten* zusammendenken bisher kaum vorliegen. Um diese ersten gesammelten Erkenntnisse mit der *scientific community* zu teilen, sollen die Projektergebnisse durch wissenschaftliche Publikationen zur Verfügung gestellt werden. So wird beispielsweise ein ausführlicher Forschungsbericht in der Schriftenreihe *Prekäres Wohnen und Wohnungslosigkeit* erscheinen und einen wissenschaftlichen Abschluss der Vorlauforschung darstellen. Dieser thematisiert erstens den aktuellen Stand der Forschung, zweitens die empirisch erprobten Hürden und (ethischen) Herausforderungen und drittens die Erkenntnisse aus den (Expertinnen und Experten-)Interviews. Letztere machen deutlich, dass das sozial hergestellte Phänomen der *migrantischen Wohnungslosigkeit* strukturelle Benachteiligungen erzeugt. Diese schränken nicht nur die Arbeit der Wohnungslosenhilfe ein, sondern errichten (migrationsbedingte) Barrieren für Empfängerinnen und Empfänger jener Hilfen. Der Wissenstransfer soll dazu beitragen, die Fachdebatte zu erweitern, weitere Forschungsvorhaben in diesem Bereich anzuregen und Forschungsdefizite im Kontext von Wohnungslosigkeit und Migration abzubauen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus ZuWoMi wurde ein ausdifferenziertes Forschungsdesign konzipiert, das eine Kombination aus einem soziologischen Mehrebenen-Ansatz (Mikro-, Meso-, Makro-Ebenen) und dem Intersektionalitätsansatz darstellt. Hintergrund dessen ist das Ergebnis, dass das Zusammendenken von Wohnungslosigkeit und Migration gleichsam mit enormen Zugangsbarrieren einhergeht und sich als soziales Phänomen höchst komplex und heterogen gestaltet, sodass andere Ungleichheitsdimensionen oder Differenzkategorien (wie zum Beispiel Alter, Geschlecht, Gesundheit)

auch immer eine Berücksichtigung erfordern. Daher ist der konzeptionelle Rahmen der Intersektionalität für migrationsbedingte Formen von Wohnungslosigkeit unerlässlich. Ein Folgeantrag für ein Forschungsvorhaben, das beabsichtigt, die Figurationen von Wohnungslosigkeit im Kontext von Migration und deren Zusammenhänge multiperspektivisch und intersektional deutend zu verstehen und ursächlich zu erklären, wurde beim Fördernetzwerks Interdisziplinäre Sozialpolitikforschung (FIS) des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) eingereicht.

Sowohl die Erkenntnisse zum Zugang zur Zielgruppe als auch erste inhaltliche Schlussfolgerungen zur Thematik sollen in einem Folgeprojekt durch Praxis-Transfer-Workshops mit Praktikerinnen und Praktikern weiter tiefgehend ausgetauscht werden. Förderlich dafür ist der mögliche Rückgriff auf das durch ZuWoMi bereits aufgebaute Netzwerk. Es wurde Kontakt zu Fachkräften der Wohnungslosenhilfe und Migrations-/Integrationsarbeit sowie Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern von Sozialämtern in Nürnberg und in Berlin hergestellt. Auch bestehende Kontakte zu wohnungslosen Migrantinnen und Migranten stellen eine wertvolle Ressource für die weitere Untersuchung dieses Themenfeldes dar.

Aufgrund der Nähe zum Hochschulkontext wurde im Rahmen des Projekts weiterhin ein Austausch innerhalb der Fakultät Sozialwissenschaften angeregt. Durch die Adaption der Thematik sowie die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse im Modul *Soziale Arbeit in der Migrationsgesellschaft* im Bachelorstudiengang Soziale Arbeit (B.A.) wurde das Thema hier nachhaltig verankert. Während in diesem Semester bereits ein studentisches Projekt zu der Thematik durchgeführt wurde, das sich Ursachen, Erscheinungsformen und Auswirkungen vor allem praxisorientiert annähert, ist zu erwarten, dass Wohnungslosigkeit im Kontext von Migration auch in Zukunft im Rahmen des Studiengangs von Studierenden thematisiert, bearbeitet oder beforscht wird.

Weiterhin ergab sich durch das Projekt ein Mehrwert für das Forschungsteam bestehend aus vier studentischen Hilfskräften. Sie bekamen praktische Einblicke in die Antragsstellung und den Ablauf eines drittmittelfinanzierten Forschungsprojekts. Durch die selbstständige Planung und praktische Anwendung von Forschungsmethoden der qualitativen Sozialforschung konnten sie an im Studium erworbenes Wissen anknüpfen und dieses erweitern, sowie erste Schreib- und Publikationserfahrungen (VODE/KLOHA/MANGIONE/SOWA 2023; VODE/SOWA 2022) sammeln, die für viele künftige professionelle Wege (Praxis, Wissenschaft, Verwaltung, Selbstständigkeit, etc.) als kulturelles und soziales Kapital verwertbar sind.

7 Literatur

- Amt für Statistik Berlin-Brandenburg (2023): Statistischer Bericht. Einwohnerregisterstatistik, Berlin, 30. Juni 2023, Potsdam.
- Atkinson, Rowland/Flint, John (2001): Accessing Hidden and Hard-to-Reach Populations: Snowball Research Strategies, in: *Social Research Update*, Heft 33.
- Becker, Howard S. (2014): *Außenseiter. Zur Soziologie abweichenden Verhaltens*, 2. Auflage, Wiesbaden: Springer VS.
- Bundesarbeitsgemeinschaft Wohnungslosenhilfe e.V. (BAG W) (2022): *Statistikbericht. Zu Lebenslagen wohnungsloser und von Wohnungslosigkeit bedrohter Menschen in Deutschland – Lebenslagenbericht. Berichtsjahr 2020. Schwerpunktthema: Medizinische Versorgung*, Berlin.
- Bundesarbeitsgemeinschaft Wohnungslosenhilfe e.V. (BAG W) (2023): *Mindestens 607.000 Menschen in Deutschland wohnungslos. BAG Wohnungslosenhilfe stellt aktuelle Hochrechnungsergebnisse vor*, Pressemitteilung vom 07.11.2023 Berlin.
- Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) (2022): *Ausmaß und Struktur von Wohnungslosigkeit. Der Wohnungslosenbericht 2022 des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales*, Bonn.
- Chwistek, Peter (2013): *Obdachlose EU-Bürger_innen und die Wiener Wohnungslosenhilfe. Eine Bestandsaufnahme*, in: *soziales_kapital: wissenschaftliches journal österreichischer fachhochschulstudiengänge soziale arbeit*, Band 10.
- Döbrich, Anna/Hund, Sabrina (2022): *Junge Geflüchtete und Leaving Care: Übergänge gestalten, Wohnungslosigkeit vermeiden. Ein Werkbuch mit Ideen aus Forschung und Praxis*, Mainz: Servicestelle junge Geflüchtete/Institut für Sozialpädagogische Forschung Mainz gGmbH.
- Flick, Uwe (2011): *Triangulation: Eine Einführung*, 3. Auflage, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Frings, Dorothee (2018): *Wohnungslosenhilfe für Migrant_innen. Teilhabe oder Ausgrenzung?*, in: Blank, Beate/Gögercin, Süleyman/Sauer, Karin E./Schramkowski, Barbara (Hrsg.): *Soziale Arbeit in der Migrationsgesellschaft. Grundlagen – Konzepte – Handlungsfelder*, Wiesbaden: Springer VS, S. 159-170.
- Giesecke, Johannes/Kroh, Martin/Tucci, Ingrid/Baumann, Anne-Luise/El-Kayed, Nihad (2017): *Armutsgefährdung bei Personen mit Migrationshintergrund. Vertiefende Analysen auf Basis von SOEP und Mikrozensus, Endbericht: Eine Studie im Auftrag der Beauftragten der Bundesregierung für Migration, Flüchtlinge und Integration*, Berlin: Berliner Institut für empirische Integrations- und Migrationsforschung der Humboldt-Universität zu Berlin (BIM).
- Girtler, Roland (1989): *Die „teilnehmende unstrukturierte Beobachtung“ – ihr Vorteil bei der Erforschung des sozialen Handelns und des in ihm enthaltenen Sinns*, in: Aster, Reiner/Merkens, Hans/Repp, Michael (Hrsg.): *Teilnehmende Beobachtung. Werkstattberichte und methodologische Reflexionen*, Frankfurt am Main: Campus Verlag, S. 103-113.
- Girtler, Roland (1992): *Methoden der qualitativen Sozialforschung: Anleitung zur Feldarbeit*, 3. Auflage, Wien: Böhlau.
- Girtler, Roland (2004): *10 Gebote der Feldforschung*, Wien: LIT.
- Glaser, Barney G./Strauss, Anselm L. (1998): *Grounded theory: Strategien qualitativer Forschung*, Bern: Huber.
- Graßhoff, Johan/Grosu, Doinita/Manavska, Desislava/Reichenbach, Marie-Therese (2016): *MigrantInnen in der „niedrigschwelligen“ Wohnungslosenhilfe: Handlungsmöglichkeiten in prekären Situationen*, in: Gillich, Stefan/Keicher, Rolf (Hrsg.): *Suppe, Beratung, Politik: Anforderungen an eine moderne Wohnungsnotfallhilfe*, Wiesbaden: Springer, S. 189-200.
- Häder, Michael (2019): *Empirische Sozialforschung. Eine Einführung*, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer VS.
- Haj Ahmad, Marie-Therese (2022a): *Grenzen der Freizügigkeit?! Ausgrenzung und Autonomie am Beispiel der Obdachlosigkeit von EU-Bürger*innen in Deutschland*, in: Sowa, Frank (Hrsg.): *Figurationen der Wohnungsnot. Kontinuität und Wandel sozialer Praktiken, Sinnzusammenhänge und Strukturen*, Weinheim/Basel: Beltz Juventa, S. 727-748.
- Haj Ahmad, Marie-Therese (2022b): *Von Ein- und Ausschlüssen in Europa. Eine ethnographische Studie zu EU-Migration und Wohnungslosigkeit in Deutschland*, Münster: Westfälisches Dampfboot.
- Heinzelmann, Frieda/Domes, Michael/Ghanem, Christian/Sowa, Frank (2023): *„Weil dieser Mensch hat's einfach in mein Kopf, in mein Herz (...) geschafft“: Zur Beziehungsgestaltung von jungen wohnungslosen Menschen und Sozialarbeiter_innen*, in: *Österreichisches Jahrbuch für Soziale Arbeit (ÖJS)*, Jg. 5, S. 161-182.
- Helfferich, Cornelia (2011): *Die Qualität qualitativer Daten. Manual für die Durchführung qualitativer Interviews*, 4. Auflage, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Hermans, Koen/Dyb, Evelyn/Knutagård, Marcus/Novak-Zezula, Sonja/Trummer, Ursula (2020): *Migration and Homelessness: Measuring the Intersections*, in: *European Journal of Homelessness*, Jg. 14, Heft 3, S. 19-41.

- Hopf, Christel (1978): Die Pseudoexploration – Überlegungen zur Technik qualitativer Interviews in der Sozialforschung, in: Zeitschrift für Soziologie, Jg. 7, Heft 2, S. 97-115.
- Khosravi, Shahram (2010): 'Illegal' Traveller. An Auto-Ethnography of Borders, Basingstoke/New York: Palgrave Macmillan.
- Mayring, Philipp (2008): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken, 10. Auflage, Weinheim: Beltz Verlag.
- Merton, Robert K. (1995): Soziologische Theorie und soziale Struktur, Berlin: de Gruyter.
- Reichenbach, Marie-Therese (2018): Homelessness of Mobile EU-citizens as One Effect of a National-European Conflict. Insights Into an Ethnography of Participation in Europe Using the Example of Germany, in: European Journal of Homelessness, Jg. 12, Heft 1, S. 41-60.
- Serpa, Regina (2023): Migrant Homelessness and the Crimmigration Control System, New York: Routledge.
- Sowa, Frank (2018): Engagiert die Lebenswelten von Wohnungslosen entdecken, in: Die Neue Hochschule (DNH), Jg. 2018, Heft 03, S. 26-29.
- Sowa, Frank (2020): „Meine Vorstellungen von Obdachlosen [wurden] (...) komplett zerstört“. Studentische Feldforschung als Beitrag zur Persönlichkeitsentwicklung?, in: Sowa, Frank/Zitzmann, Christina (Hrsg.): Anders lehren und lernen. Forschendes Service Learning über Lebenswelten von Menschen in Wohnungsnot, Frankfurt am Main: Wochenschau Verlag, S. 34-58.
- Sowa, Frank/Staples, Ronald/Theuer, Stefan/Althaus, Rajiv (2013): Beratungsgespräche in der Arbeitsverwaltung teilnehmend beobachten. Reflexion über eine Methode der qualitativen Sozialforschung, in: Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research, Jg. 14, Heft 2.
- Sowa, Frank/Zitzmann, Christina (Hrsg.)(2020): Anders lehren und lernen. Forschendes Service Learning über Lebenswelten von Menschen in Wohnungsnot, Frankfurt am Main: Wochenschau Verlag.
- Stadt Nürnberg - Amt für Stadtforschung und Statistik (2022): Bevölkerungshoch in Nürnberg und Fürth. Berichte aus Stadtforschung und Statistik (M531), Nürnberg.
- Tsirikiotis, Athanasios/Sowa, Frank (2022): Armut und Wohnungslosigkeit, in: Marquardsen, Kai (Hrsg.): Armutsforschung. Handbuch für Wissenschaft und Praxis, Baden-Baden: Nomos/edition sigma, S. 281-294.
- Vode, Dzifa/Kloha, Johannes/Mangione, Cosimo/Sowa, Frank (Hrsg.)(2023): Schreiben lernen und lehren im Studium der Sozialen Arbeit, Bielefeld: wbv.
- Vode, Dzifa/Sowa, Frank (Hrsg.)(2022): Schreiben publikationsorientiert lehren: Hochschulische Schreiblehrkonzepte aus der Praxis, Bielefeld: wbv.
- Wernet, Andreas (2009): Einführung in die Interpretationstechnik der Objektiven Hermeneutik, 3. Auflage, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Recycling von komplexen Kompositprodukten – Prozessschritt Zerkleinerung

Prof. Dr. Ing. Ulrich Teipel

Fakultät Verfahrenstechnik / Forschungsgruppe „Partikeltechnologie und Rohstoffeffizienz“

Patrick Walther, M. Sc.

Fakultät Verfahrenstechnik / Forschungsgruppe „Partikeltechnologie und Rohstoffeffizienz“

Zusammenfassung:

Im Rahmen des Vorlaufforschungsprojektes wurde das Verhalten von Materialien mit komplexem Materialverhalten untersucht. Hierbei wurden die Polymere Polymethylmethacrylat, Polyamid und Polyoxymethylen mittels Prall-, Schneid- und Druckbeanspruchung getestet und ihr Bruchverhalten gegenüber diesen Beanspruchungsarten analysiert. Aus den Experimenten konnte die erforderliche Zerkleinerungsarbeit, die zum Bruch geführt hat, ermittelt und abhängig davon in den Kontext der Bruchwahrscheinlichkeit eingeordnet werden. Dabei wurden die empirischen Daten von massenbezogener Zerkleinerungsarbeit und Bruchwahrscheinlichkeit mit dem Modell zur Bruchwahrscheinlichkeit von Weichert, sowie dem Modell von Vogel und Peukert verglichen. Mit den vorhandenen Daten ist festzustellen, dass beide Modelle das Bruchverhalten der getesteten Polymere hinreichend gut beschreiben.

1 Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Juli bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Verfahrenstechnik, Forschungsgruppe „Partikeltechnologien, Rohstoffinnovationen und Ressourceneffizienz“ (FPR)
Projektleitung	Prof. Dr. Ing. Ulrich Teipel
Projektteam	Patrick Walther, M. Sc.
Kontakt Daten Projektleitung	ulrich.teipel@th-nuernberg.de

2 Ausgangslage

Recycling ist im Wesentlichen ein komplexes Zusammenspiel an Prozessschritten, die allesamt das Ziel haben, das zu recycelnde Stoffsystem möglichst effektiv zu verarbeiten, so dass die darin enthaltenen Wertstoffe wieder als Rohstoffe für neue Produkte in anderen Prozessketten und in möglichst guter Qualität und hoher Quantität zur Verfügung stehen. So werden neben Sortier- und Waschprozessen auch Schritte zur Zerkleinerung durchgeführt, um die Stoffe so weit aufzubereiten, dass sie anschließend weiterverarbeitet werden können. So werden bereits Kunststoffe aus Privathaushalten (Post-Consumer-Abfälle) und solche aus Industrieprozessen (Post-Industrial-Abfälle) als sogenannte Rezyklate wiederverwertet [1]–[3]. Der Weg dorthin ist allerdings sehr komplex und energieintensiv. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der energetische Wirkungsgrad beim maschinellen Zerkleinern im Allgemeinen gering ist [4]. Der Energiebedarf ist aber gleichzeitig sehr hoch, in etwa vier Prozent des weltweiten Energiebedarfs wird für Zerkleinerung benötigt [5], [6].

In der Wissenschaft beschäftigt man sich seit langer Zeit mit dem Thema der Zerkleinerung. So hat sich bereits *Hertz* [7], [8] damit beschäftigt, wie sich unter anderem Kugeln verhalten, wenn man sie aneinanderpresst. Daraus erschloss sich die Notwendigkeit von materialspezifischen Parametern, die von *Huber* 1904 [9] aufgegriffen wurden.

Bereits 1933 haben *Carey* und *Bosanquet* [10] sich mit dem Bruchverhalten von spröden Materialien auseinandergesetzt, im konkreten Fall kubische Partikel aus Kohle durch Druckbeanspruchung und eine Fallapparatur.

Generell wurde das Bruchverhalten von spröden Materialien ausgiebig untersucht. *Schönert* und *Rumpf* [11] zum Beispiel haben sich mit der Einzelkornzerkleinerung von Glaskugeln, Quarz, Kalkstein, Zementklinker unter anderem mittels Prall- und Druckbeanspruchung in einer Walzenmühle beschäftigt.

Behrens [12] hat 1965 die Einzelkornzerkleinerung mittels Prallbeanspruchung an Glaskugeln und unregelmäßig geformten Teilchen aus Schwespat und Kalkstein untersucht.

Im Bereich der Polymerzerkleinerung haben sich unter anderem *Vogel* und *Peukert* mit der Einzelkornzerkleinerung von Polymethylmethacrylat PMMA und Polystyrol PS auseinandergesetzt. Sie konnten mit ihrer Apparatur die Prallzerkleinerung am Einzelkorn analysieren, ebenso den Übertrag der Prallzerkleinerung auf eine Mühle im Labormaßstab [13]–[15].

Für die Zerkleinerungsarbeit wurden in der Vergangenheit bereits bruchtheoretische Modelle entwickelt, die nach verschiedenen Kriterien die Bruchwahrscheinlichkeit beschreiben.

So hat in etwa *Weichert* [16] ausgehend von den Grundlagen der Verteilung nach *Weibull* [17] eine Gleichung aufgestellt, welche die Bruchwahrscheinlichkeit für sphärische Partikel beschreibt:

$$P_B = 1 - \exp(-c \cdot x^2 \cdot W_m^z) \quad (1)$$

Dabei ist P_B die Bruchwahrscheinlichkeit, x ist der Durchmesser des sphärischen Partikels, W_m die massenbezogene Zerkleinerungsarbeit, c und z sind stoffspezifische Parameter, die über Zerkleinerungsexperimente ermittelt werden müssen.

Ein weiteres wichtiges Bruchwahrscheinlichkeitsmodell wurde von *Vogel* und *Peukert* [13] entwickelt:

$$P_B = 1 - \exp(-f_{\text{mat}} \cdot k \cdot x \cdot (W_{m,\text{kin}} - W_{m,\text{min}})) \quad (2)$$

Bei diesem Modell wird die Bruchwahrscheinlichkeit P_B beschrieben über eine materialspezifische Konstante f_{mat} und die Anzahl k der Beanspruchungen. Der Partikeldurchmesser x geht hier wieder ein, allerdings zusätzlich zur massenbezogenen Zerkleinerungsarbeit $W_{m,\text{kin}}$, abgeleitet aus der kinetischen Energie noch die minimal zur Zerkleinerung benötigte Energie $W_{m,\text{min}}$.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Mit diesem Forschungsprojekt soll die Grundlage geschaffen werden, das Bruchverhalten von komplexen Materialien besser zu verstehen. Nachdem für die allermeisten Polymere und nachwachsenden Rohstoffe völlig unbekannt ist, wie sich diese bei Zerkleinerung verhalten, oder was die pro Materialart am besten geeignete Beanspruchungsart ist, um die Partikel zerkleinern zu können.

Dabei sollten verschiedene Partikel mit komplexem Materialverhalten untersucht werden, wie etwa Eichen- und Fichtenholz, die Polymere Polymethylmethacrylat PMMA, Polyamid PA66 und das Polyoxymethylen POM-C. Dabei sollten die Beanspruchungsarten Prall, Schneid und Druck untersucht werden.

Um die Einflüsse der Zerkleinerungsapparate auf die Zerkleinerung so gut wie möglich vom Zerkleinerungsereignis separieren zu können, und um die Anzahl der Zerkleinerungsereignisse pro Partikel kontrollieren zu können, sollten alle Partikel mittels Einzelkornzerkleinerung gezielt in eigens dafür entwickelten Apparaturen getestet werden.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

4.1 Apparatur für Prall- und Schneidbeanspruchung

Für die Einzelkornzerkleinerung durch Prall- und Schneidbeanspruchung wurde ein Paintball-Markierer ① so modifiziert, dass er nicht mehr den eigens dafür vorgesehenen Farbbehälter trägt, sondern die Beladeeinheit mit einem Trichter verjüngt, sodass die zu untersuchenden Partikel problemlos einzeln geladen werden können. Ist das Partikel in der Beladeeinheit, wird der Schuss durch einen Bolzen ausgelöst, der mit einer vorher angeschlossenen Druckluft-Gasflasche (200 bar) betrieben wird. Die Paintball-Apparatur selbst ist auf maximal 50 bar gedrosselt, was die maximal freisetzbare kinetische Energie nach oben hin limitiert. Nach unten hin eingestellt werden kann der Druck am Griff des Paintball-Markierers, indem die Gaszufuhr mittels Inbus-Schlüssel nach unten reguliert werden kann, um auch kleinere Druckbereiche abzudecken. Jedoch ist immer ein Mindestdruck notwendig, da der Bolzen sonst nicht auslösen kann. Der Lauf des Markers ist aus Sicherheitsgründen in einem geschlossenen Plexiglaskasten ② und zielt auf eine Prallplatte, die je nach Beanspruchungsart modifiziert werden kann. In Abbildung 1 ist die Platte mit Schneide für die Schneidbeanspruchung montiert. Der Versuchsstand wird mit einem Strahler ③ beleuchtet, um genug Licht zur Verfügung zu haben, da die Hochgeschwindigkeitskamera KEYENCE VW-600M ④ umso mehr Licht braucht, je höher Bildwiederholungsrate und je

niedriger Belichtungsdauer sind. Ausgewertet wird mit der zugehörigen Software VW-9000 MotionAnalyzer ⑤.

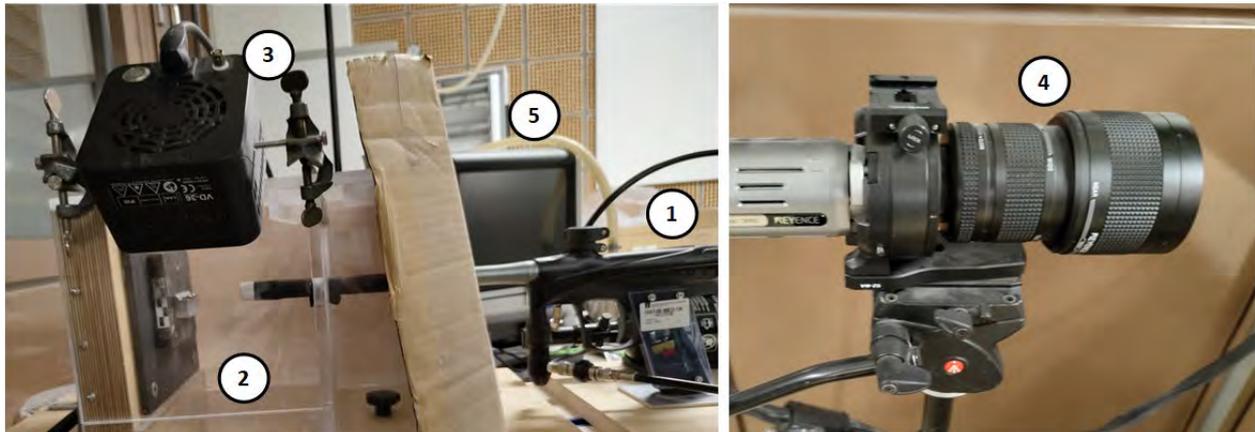


Abbildung 1: links: Schießapparat für Prall- und Druckbeanspruchung; rechts: Kamera VW-600M (Fa. KEYENCE). Bild: Ulrich Teipel

Partikel in einen dafür vorgesehen Platz in der Anlage ① gelegt und der Stempel von oben an das Partikel herangeführt. Die Bedienung erfolgt über einen hydraulischen Hebel ②. Über einen Datenschreiber ③ wird die Kraft ermittelt, mit der das Partikel beansprucht wird, gleichzeitig nimmt er auch die zurückgelegte Strecke auf, die der Eindringtiefe in das Partikel entspricht. Diese Kraft–Weg-Kurve wird dann in einer csv-Datei gespeichert und kann mit gängigen Datenverarbeitungsprogrammen wie zum Beispiel Microsoft Excel ausgewertet werden.

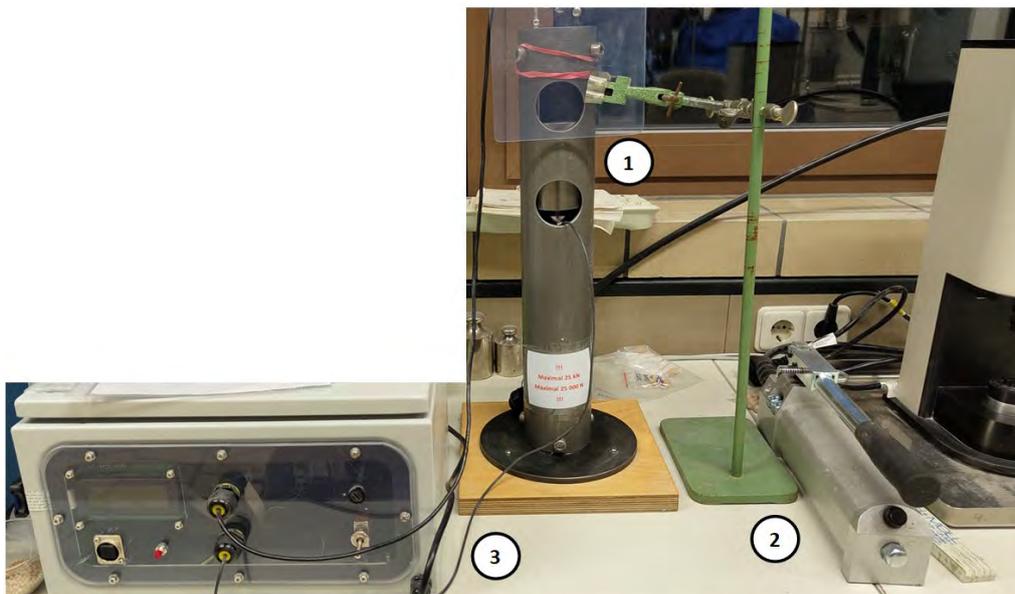


Abbildung 2: Versuchsstand Druckbeanspruchung mit Datenschreiber und Hydraulik. Bild: Ulrich Teipel

4.3 Ergebnisse Prallbeanspruchung

Eiche:

Das Eichenholz in Form sphärischer Partikel mit einem Durchmesser von $x = 4 \text{ mm}$ und einem Wassergehalt von $\phi = 0,19 \text{ wt. \%}$ wurde mittels der oben aufgeführten Prallapparatur beansprucht. Es konnte bei einer mittleren massebezogenen Energie $W_{m,kin} = 10.136 \text{ J kg}^{-1}$ eine Bruchwahrscheinlichkeit von 93 Prozent erzeugt werden. Bei dieser Partikelart, die einen geringen Wassergehalt aufweist, konnte eine minimale massebezogene Energie von $W_{m,min} = 2.475 \text{ J kg}^{-1}$ ermittelt werden und die vom

Weichert'schen Modell eingeführte Parameter mit $c = 0,42 \text{ kg}^z \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-z}$ und der Exponent $z = 1,380$ errechnet werden.

Fichte:

Die auf Prall getesteten Kugeln aus Fichtenholz mit $x = 4 \text{ mm}$ und einem Wassergehalt von $\phi = 0,27 \text{ wt. \%}$ brachen bei einer mittleren massebezogenen Energie von $W_{m,kin} = 13.080 \text{ J kg}^{-1}$ zu 58 Prozent. Um auf eine ähnlich hohe Bruchwahrscheinlichkeit von 90 Prozent wie bei gleichen Bedingungen für Eichenholz zu kommen, wäre eine deutlich höhere massenbezogene Energie von annähernd 40.000 J kg^{-1} notwendig.

Für die Partikel aus Fichtenholz konnte eine minimale Energie von $W_{m,min} = 3.205 \text{ J kg}^{-1}$ und die Modellparameter nach Weichert mit $c = 30,33 \text{ kg}^z \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-z}$ und $z = 0,7924$ bestimmt werden.

Die Diagramme der Bruchwahrscheinlichkeiten der untersuchten Holzarten sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 aufgeführt.

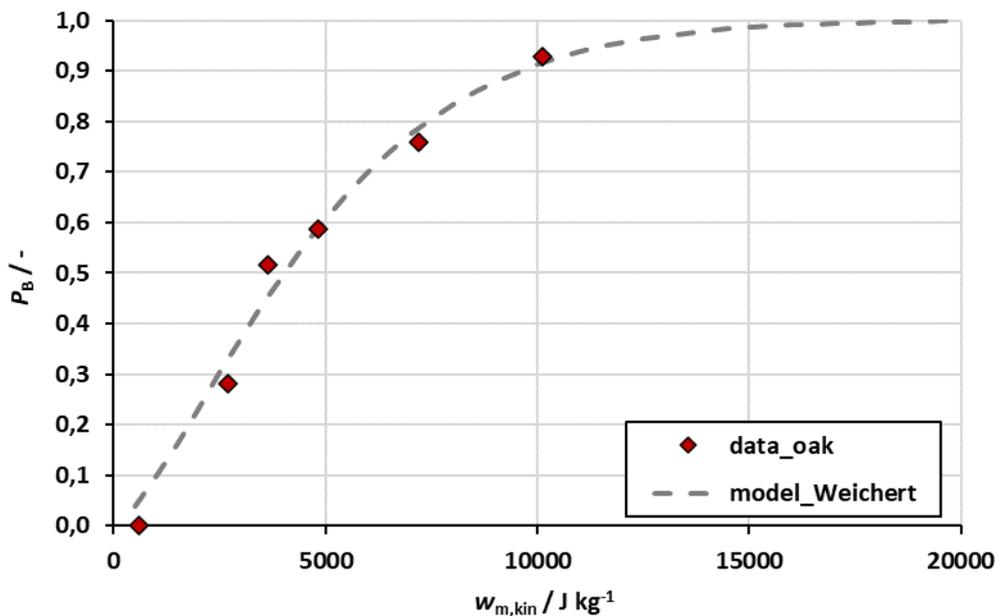


Abbildung 3: Bruchwahrscheinlichkeit von Eichenholzkugeln, $\phi = 0,19 \text{ wt. \%}$, $x = 4 \text{ mm}$. Bild: Patrick Walther

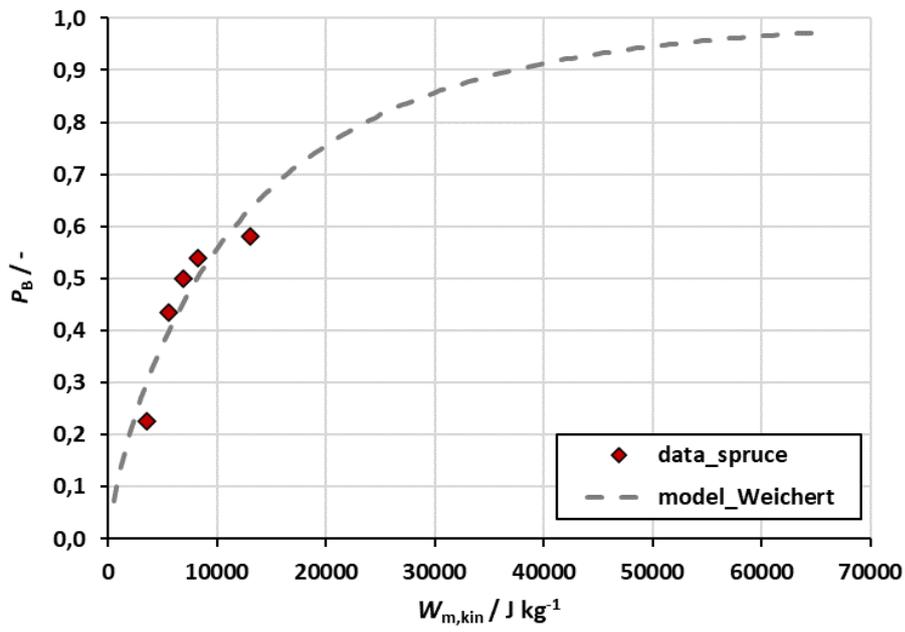


Abbildung 4: Bruchwahrscheinlichkeit von Fichtenholzkugeln, $\phi = 0,27$ wt. %, $x = 4$ mm. Bild: Patrick Walther

In den Abbildungen 5 bis 7 sind die Bruchwahrscheinlichkeiten aus den Messungen für die Polymere PMMA, POM-C und PA66 und jeweils die Modellverläufe nach Vogel und Peukert sowie von Weichert aufgeführt.

PMMA:

Die Prallbeanspruchung von PMMA mit einem Durchmesser von $x = 12$ mm führte dazu, dass bereits bei einer mittleren massenbezogenen Energie $W_{m,kin}$ von 405 J kg^{-1} eine Bruchwahrscheinlichkeit P_B von 20 Prozent ermittelt werden konnte. Bei einer massenbezogenen Energie von $W_{m,kin} = 710 \text{ J kg}^{-1}$ waren bereits 90 Prozent der Partikel gebrochen, ab 3.604 J kg^{-1} konnte verzeichnet werden, dass alle Partikel gebrochen waren.

Die Messungen genügen den Modellen von Weichert, Vogel und Peukert hinreichend gut. Es konnte aus den vorhandenen Daten ein Materialfaktor von $f_{mat} = 0,27 \text{ kg J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ für die Prallbeanspruchung von PMMA, sowie eine minimale massenbezogene Zerkleinerungsenergie von $W_{m,min} = 267 \text{ J kg}^{-1}$ ermittelt werden. Die Modellparameter nach Weichert betragen $c = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ kg}^z \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-z}$ und $z = 3,08$.

POM-C:

Für die sphärischen Partikel aus POM-C mit $x = 12$ mm konnten die Kugeln bei $W_{m,kin} = 1.066 \text{ J kg}^{-1}$ mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent zerkleinert werden. Aus den Daten geht hervor, dass ab 3.179 J kg^{-1} das Bruchereignis gesichert eingetreten ist. Dabei wurden die Modellparameter nach Weichert ermittelt mit $c = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}^z \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-z}$ und $z = 2,10$. Der Materialfaktor betrug $f_{mat} = 0,17 \text{ kg J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und die minimal notwendige, massenbezogene Zerkleinerungsenergie $W_{m,min} = 196 \text{ J kg}^{-1}$.

PA66:

Die Partikel aus PA66 konnten mittels Prallbeanspruchung zerkleinert werden. Allerdings wurde nie eine Bruchwahrscheinlichkeit von 100 Prozent erreicht. Der Großteil der erzeugten mittleren massenbezogenen Energien lag zwischen $W_{m,kin} = 3.676 \text{ J kg}^{-1}$ und $W_{m,kin} = 4.074 \text{ J kg}^{-1}$, bei denen Bruchwahrscheinlichkeiten zwischen 60 Prozent und 90 Prozent ermittelt wurden. Wie in Abbildung 8 erkennbar, folgen die Bruchwahrscheinlichkeiten dabei keinem nachvollziehbaren Trend, sondern streuen im betrachteten Bereich zufällig. Die erzeugten Modellparameter nach Weichert ($c = 0,06 \text{ kg}^z \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-z}$ und $z = 1,45$), sowie der Materialfaktor $f_{mat} = 0,03 \text{ kg J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ und die minimal notwendige, massenbezogene Zerkleinerungsenergie $W_{m,min} = 598 \text{ J kg}^{-1}$ haben daher mit hoher Sicherheit nur wenig Aussagekraft über das Bruchverhalten von PA66 durch Prallbeanspruchung am Einzelkorn.

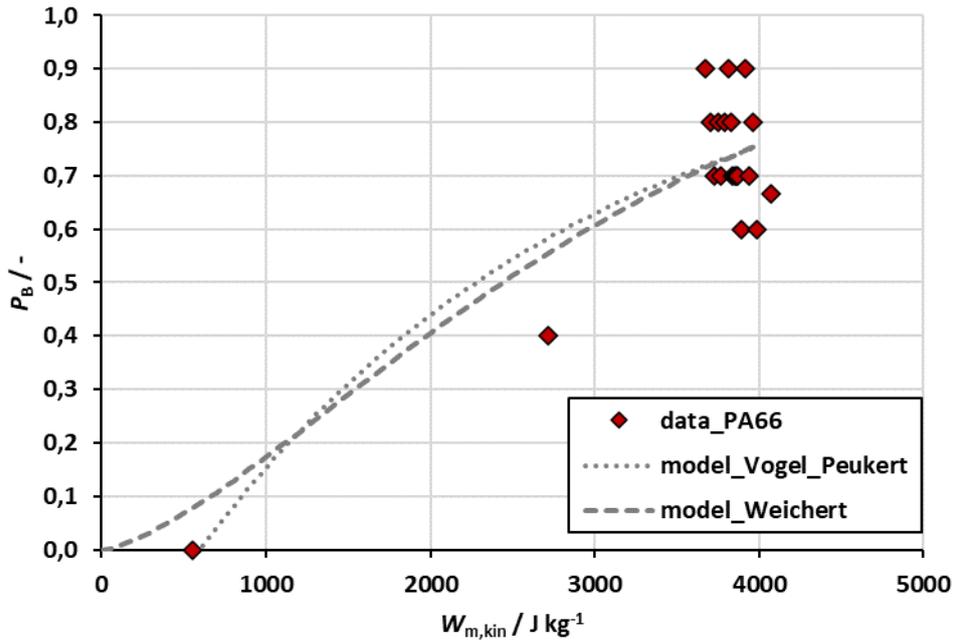


Abbildung 6: Bruchwahrscheinlichkeit von PA66 durch Prallbeanspruchung, $x = 12$ mm. Bild: Patrick Walther

Ergebnisse Schneidbeanspruchung

PMMA:

Die Partikel konnten mittels Schneidbeanspruchung gebrochen werden. So war die Bruchwahrscheinlichkeit bei einer mittleren massenbezogenen Energie von $W_{m,kin} = 294 J kg^{-1}$ von $P_B = 60$ Prozent zu verzeichnen. Bis auf einen Ausreißer, der versuchsbedingt entstand, konnten ab $W_{m,kin} = 499 J kg^{-1}$ alle zu 100 Prozent gebrochen werden. Auch bei der Schneidbeanspruchung entsprachen die experimentellen Daten den Modellen von Weichert, sowie von Vogel und Peukert, wie in Abbildung 8 zu sehen ist.

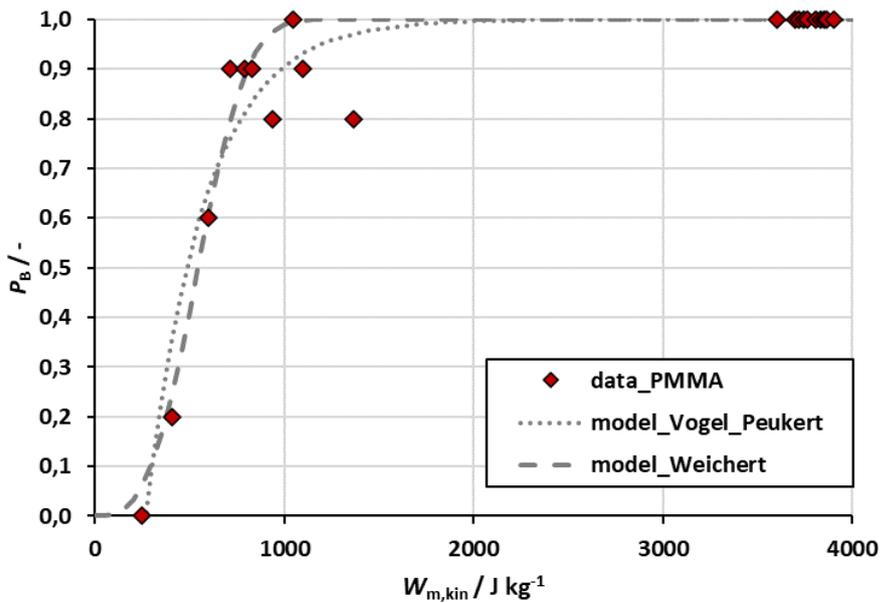


Abbildung 5: Bruchwahrscheinlichkeit PMMA durch Prallbeanspruchung, $x = 12$ mm. Bild: Patrick Walther

Dabei konnten die Modellparameter $c = 0,052 \text{ kg}^z \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-z}$ und $z = 2,05$ ermittelt werden, sowie ein Materialfaktor $f_{\text{mat}} = 0,754 \text{ kg J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ bei einer minimalen Zerkleinerungsenergie von $W_{\text{m,min}} = 205 \text{ J kg}^{-1}$.

Die maximal eingesetzte Energie war mit 1.287 J kg^{-1} deutlich kleiner als bei der Prallbeanspruchung ($W_{\text{m,kin}} = 3.902 \text{ J kg}^{-1}$).

POM-C:

Für POM-C konnten die Partikel mittels Schneidbeanspruchung hinreichend gut zerkleinert werden. Es konnte ein Materialfaktor $f_{\text{mat}} = 0,300 \text{ kg J}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ermittelt werden bei einer minimalen Zerkleinerungsenergie von $W_{\text{m,min}} = 211 \text{ J kg}^{-1}$.

Auch für POM-C war die maximal eingesetzte Energie mit $W_{\text{m,kin}} = 1104 \text{ J kg}^{-1}$ signifikant niedriger (Prallbeanspruchung: $W_{\text{m,kin}} = 3450 \text{ J kg}^{-1}$). Der Verlauf ist in Abbildung 9 abgebildet.

PA66:

Im Gegensatz zur Prallbeanspruchung, konnte PA66 mit der Schneide so beansprucht werden, dass es einem Trend (siehe Abbildung 10) folgt und die Modelle (WEICHERT, VOGEL UND PEUKERT) anwendbar sind, um die Modellparameter zu bestimmen. So konnte der Materialfaktor $f_{mat} = 0,336 \text{ kg J}^{-1}$ ermittelt werden und eine minimale massenbezogene Energie von $W_{m,min} = 369 \text{ J kg}^{-1}$.

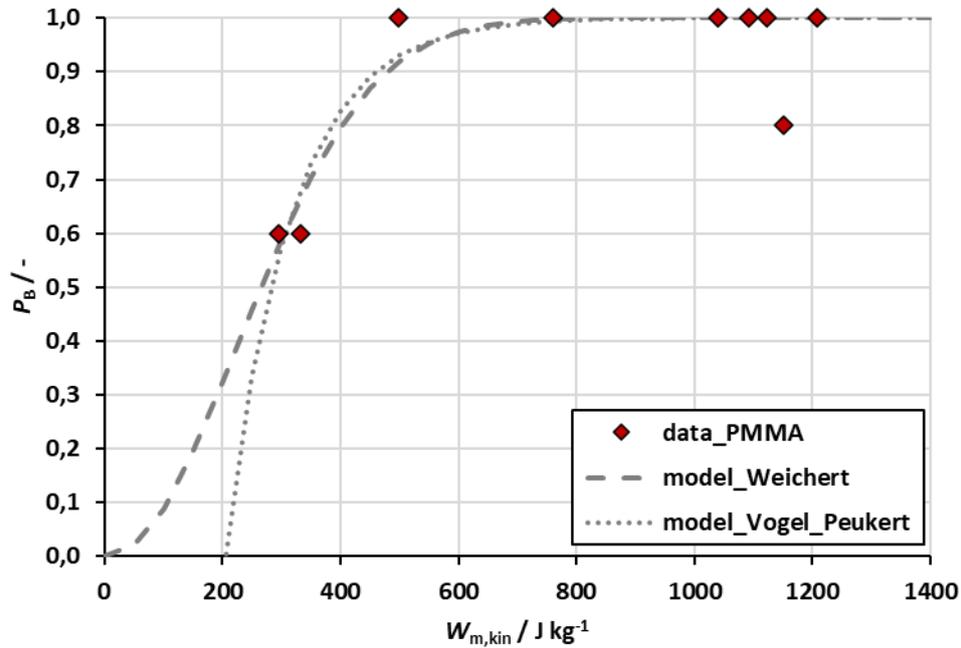


Abbildung 7: Bruchwahrscheinlichkeit von PMMA durch Schneidbeanspruchung, $x = 12 \text{ mm}$. Bild: Patrick Walther

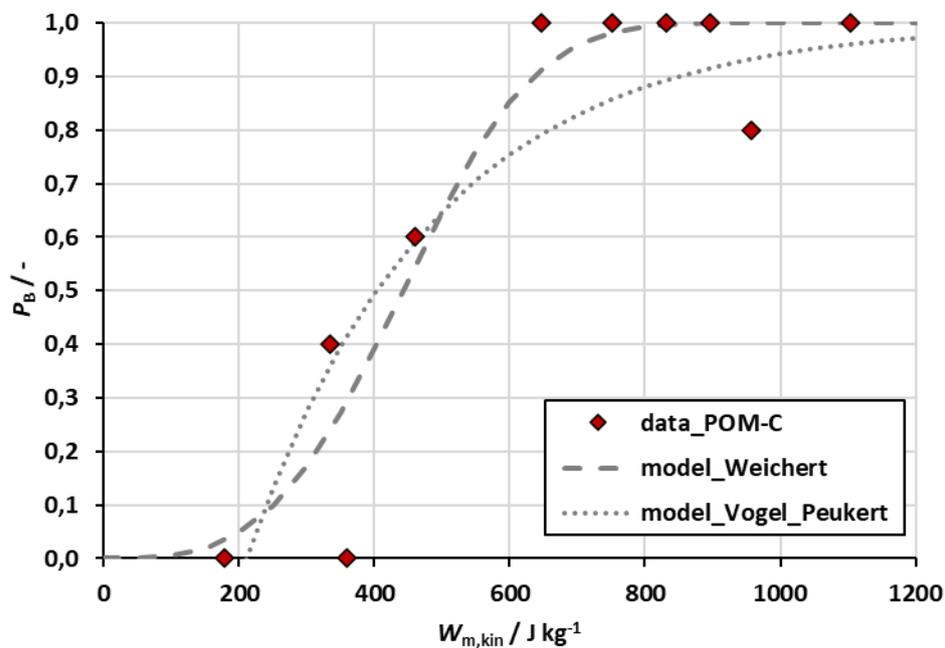


Abbildung 8: Bruchwahrscheinlichkeit von POM-C durch Schneidbeanspruchung, $x = 12 \text{ mm}$. Bild: Patrick Walther

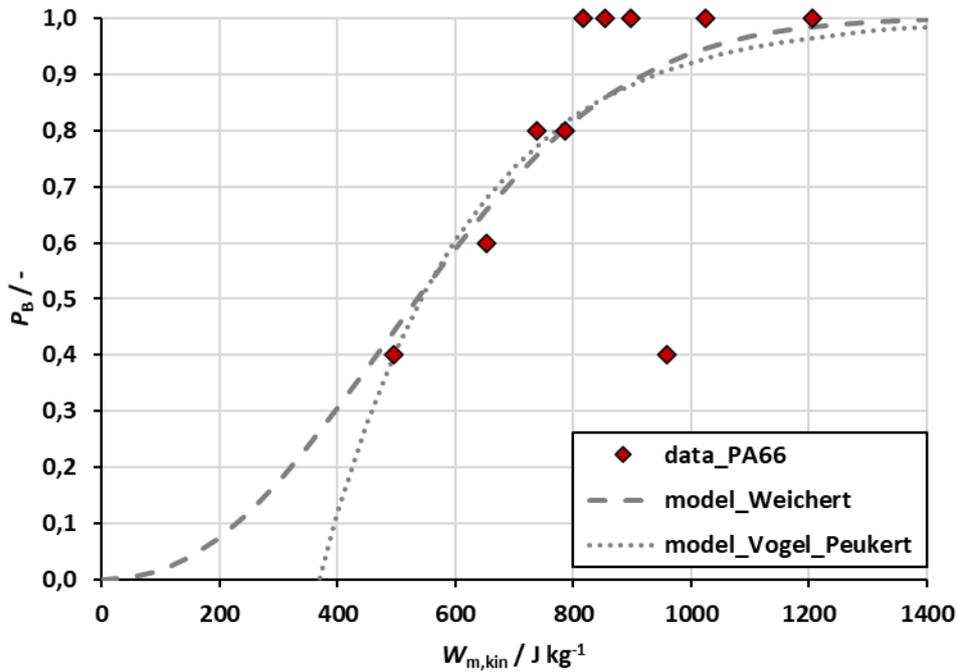


Abbildung 9: Bruchwahrscheinlichkeit von PA66 durch Schneidbeanspruchung, $x = 12 \text{ mm}$. Bild: Patrick Walther

5 Ergebnisse Druckbeanspruchung

Bei der Druckprüfung wurde geprüft, ob es zum Bruch kommt und wieviel Kraft F dafür notwendig ist und welcher Weg s bei einachsiger Beanspruchung erforderlich ist, dass es zum Bruch kommt. Exemplarisch ist in Abbildung 11 der Weg-Kraft-Verlauf von PMMA abgebildet. Das hier beanspruchte Partikel ist bei einer Kraft von $F_{\max} = 4.615 \text{ N}$ bei einem zurückgelegten Stempelweg von $\Delta s = 3,96 \text{ mm}$ gebrochen.

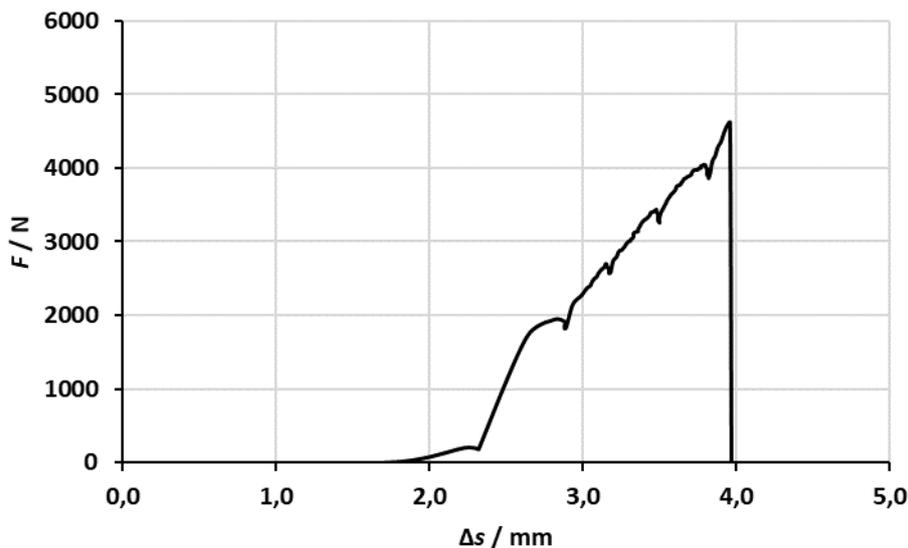


Abbildung 10: Kraft-Weg-Verlauf der Druckbeanspruchung eines Partikels PMMA, $x = 12 \text{ mm}$. Bild: Patrick Walther

PMMA:

Bei PMMA sind bei der Druckbeanspruchung bis zu einer angelegten Kraft von $F = 2.500$ N nur 6 Prozent der Partikel gebrochen. Bei $F = 4.000$ N sind bereits 86 Prozent der Partikel gebrochen. Für die maximal erzeugte Kraft von $F_{\max} = 4.615$ N sind schließlich alle Partikel gebrochen.

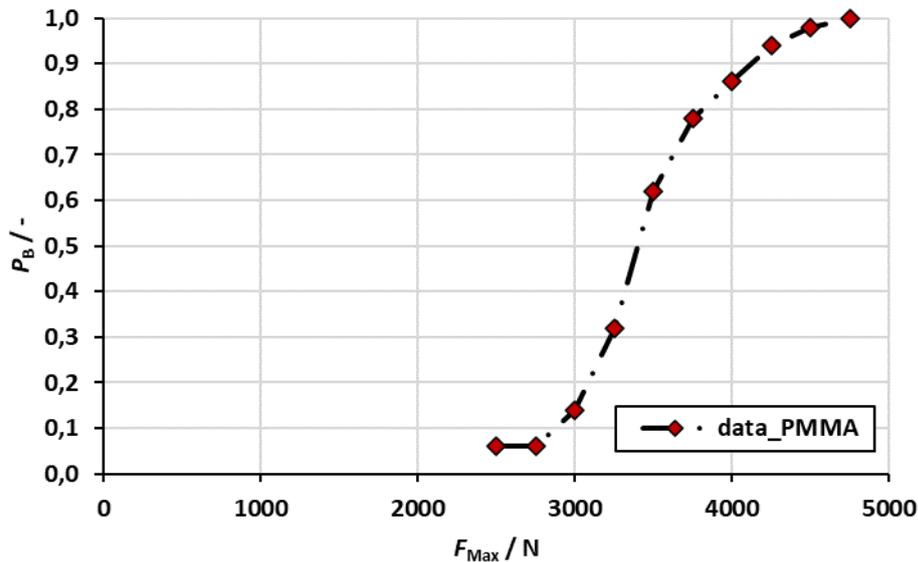


Abbildung 11: Kraftverlauf und Bruchwahrscheinlichkeit der Druckbeanspruchung von PMMA. Bild: Patrick Walther

F_{\max} / N	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	4750
$P_B [\%]$	6	6	14	32	62	78	86	94	98	100

Tabelle 1: Kraftklassen der Druckbeanspruchung von PMMA und die resultierenden Bruchwahrscheinlichkeiten

POM-C:

Die Bruchwahrscheinlichkeit von POM-C entwickelte sich mit steigender Druckbeanspruchung ähnlich der von PMMA (Vergleich Abbildung 12 und 13). So ist in den ersten 2.500 N die Bruchwahrscheinlichkeit 4 Prozent und entwickelt sich in einem Intervall von 2.500 N bis zu einer Wahrscheinlichkeit von

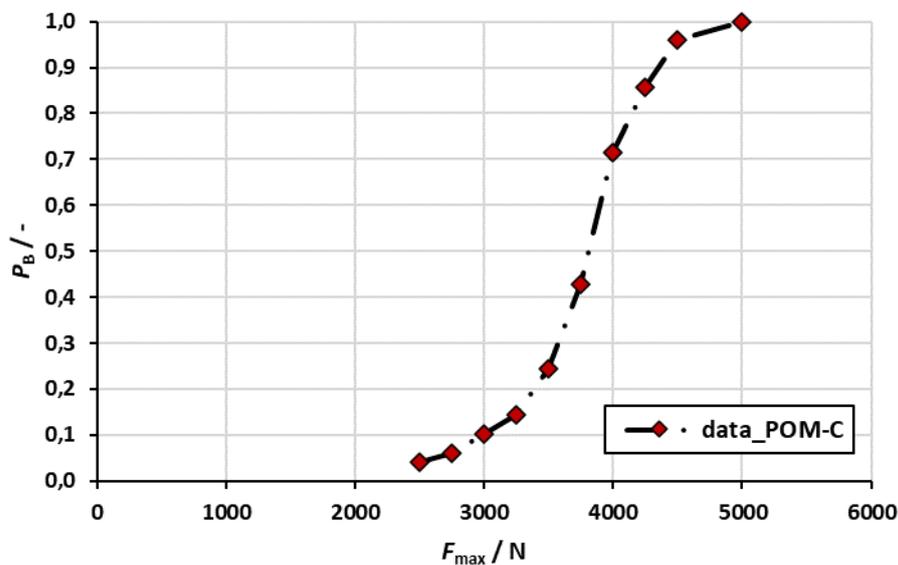


Abbildung 12: Kraftverlauf und Bruchwahrscheinlichkeit der Druckbeanspruchung von POM-C. Bild: Patrick Walther

100 Prozent, dass die Partikel gebrochen sind. Die maximal gemessene Kraft, bei der alle Partikel gebrochen sind, beträgt $F = 4.620 \text{ N}$.

F_{\max} / N	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250	4500	5000
$P_B / \%$	4	6	10	14	24	43	71	86,5	96	100

Tabelle 2: Kraftklassen der Druckbeanspruchung von POM-C und die ermittelten Bruchwahrscheinlichkeiten

PA66:

Mit Druckbeanspruchung konnte PA66 nicht gebrochen werden. Alle Partikel wurden maximal beansprucht. Die maximale Kraft betrug $F_{\max} = 24386 \text{ N}$. Der Weg-Kraft-Verlauf ist dabei in Abbildung 14 dargestellt. Die Partikel wurden dabei dauerhaft plastisch verformt. Aus Abbildung 15 geht hervor, dass die angelegte Kraft F sich dabei zwischen $F = 19822 \text{ N}$ und $F = 24386 \text{ N}$ befand. Dabei hat der Stempel einen Weg zwischen $\Delta s = 5,67 \text{ mm}$ und $\Delta s = 9,00 \text{ mm}$ zurückgelegt. Da die Partikel ausschließlich plastisch verformt wurden, ist die Druckbeanspruchung für PA66 unter den vorliegenden Bedingungen nicht zur Zerkleinerung geeignet.

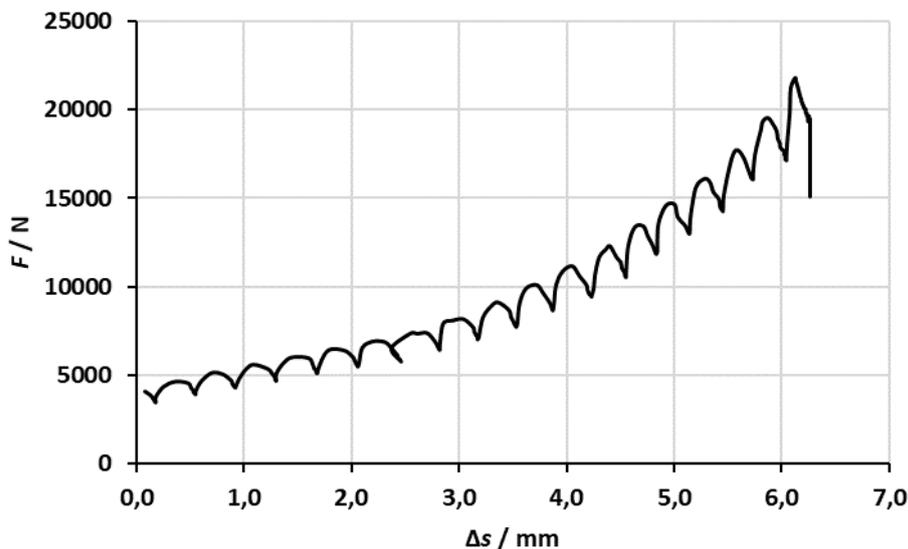


Abbildung 13: Kraft-Weg-Verlauf der Druckbeanspruchung von PA66. Bild: Patrick Walther

6 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Diese Arbeiten beinhalten einen ausgiebigen Nachhaltigkeitsindex, denn die Zerkleinerung ist einer der ersten Prozessschritte eines Recyclingprozesses, beziehungsweise im Rahmen von Kreislaufwirtschaftsprozessen („Circular economy“).

In Folge dieses Vorlauforschungsprojekt wird 2024 (auch zur angestrebten Promotion von Hr. Walther) ein DFG-Einzelantrag gestellt.

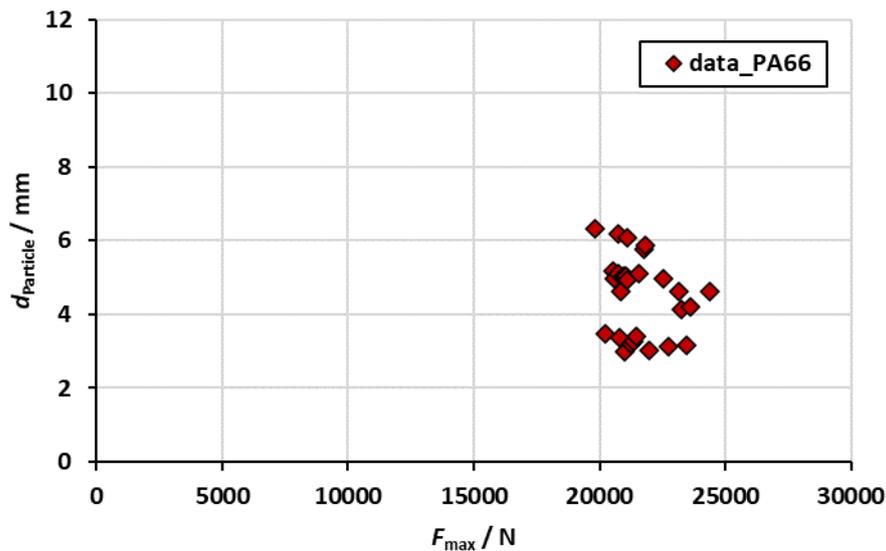


Abbildung 14: Resultierender Partikeldurchmesser durch Druckbeanspruchung von PAA66. Bild: Patrick Walther

7 Literatur

- [1] H. Moser, M. Fabian, M. Jung, et. al, „Position Oktober 2016 - Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes“. 2016. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/170601_uba_pos_kunststoffrecycling_dt_bf.pdf
- [2] „Rezyklate in Kunststoffprodukten - Bestimmung, Anforderungen, Rückverfolgbarkeit und Kennzeichnung“, IK Industrievereinigung Kunststoffverpackungen e.V., 2022.
- [3] C. Lindner, J. Schmitt, et. al., „Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen“, Conversio - Market & Strategy, Studie, 2022.
- [4] M. Zogg, *Einführung in die mechanische Verfahrenstechnik: Mit 29 Tabellen und 32 Berechnungsbeispielen.*, 3. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1993.
- [5] J. Jeswiet, A. Szekeres, „23rd CIRP Conference on Life Cycle Engineering - Energy Consumption in Mining Comminution“, *Procedia CIRP*, Bd. 48, S. 140–145, 2016.
- [6] A. Jankovic, D. La Rosa, W. Valery, „Fine grinding in the Australian Mining Industry“, gehalten auf der Metso Minerals Process Technology Australia and Asia-Pacific, 2003.
- [7] H. Hertz, „Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte.“, *Verhandlungen Ver. Zur Beförd. Gewerbefleisses*, Bd. 61–62, S. 449–464, 1882.
- [8] H. Hertz, „Über die Berührung fester elastischer Körper“, *Crelles J.*, Bd. 92, S. 156–171, 1881.
- [9] M. T. Huber, „Zur Theorie der Berührung fester elastischer Körper“, *Ann Phys*, Bd. 319, Nr. 6, S. 153–163, 1904.
- [10] W. F. Carey, C. H. Bosanquet, „A Study of crushing brittle solids“, *J Soc Glass Technol*, Nr. 17, S. 384–411, 1933.
- [11] K. Schönert, H. Rumpf, „Technische Feinzerkleinerung mit Einzelkornbeanspruchung zwischen zwei Flächen“, *Chem Ing Techn*, Bd. 37, Nr. 3, S. 259–264, 1965.

- [12] D. Behrens, „Prallzerkleinerung von Glas-Kugeln und unregelmäßig geformten Teilchen aus Schwerspat, Kalkstein und Quarzsand“, *Chem Ing Techn*, Bd. 37, Nr. 5, S. 473–483, 1965.
- [13] L. Vogel, W. Peukert, „Breakage behaviour of different materials - construction of a mastercurve for the breakage probability“, *Powder Tech*, Bd. 129, S. 101–110, 2003.
- [14] L. Vogel, W. Peukert, „From single particle impact behaviour to modelling of impact mills“, *Chem Eng Sci*, Bd. 60, S. 5164–5176, 2005.
- [15] L. Vogel, W. Peukert, „Determination of material properties relevant to grinding by practicable lab-scale milling tests“, *Int J Min. Process*, Bd. 74S, S. 329–338, 2004.
- [16] R. Weichert, „Correlation Between Probability of Breakage and Fragment Size Distribution of Mineral Particles“, *Int J Min. Process*, Bd. 22, S. 1–8, 1988.
- [17] W. Weibull, „A Statistical Distribution Function of Wide Applicability“, *J Appl Math*, Bd. 18, S. 293–297, 1951.

CGF – Erzeugung affektiver Computer-generierter Filmmusik mittels Sprach-Emotionserkennung

Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik/Kompetenzzentrum OHM-UX

Garri Steba, M. Eng.

Fakultät Design

Tom Schmid, M. Eng.

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik/Kompetenzzentrum OHM-UX

Zusammenfassung:

Im Rahmen dieses Projekts wurden zwei verschiedene Implementierungen von Sprachemotions-Erkennungsmodellen verglichen. Im Fokus steht dabei die Bewertung ihrer Wirksamkeit bei der Erfassung und Charakterisierung von Dialogen, die von Schauspielern innerhalb einer Filmszene gesprochen werden, um dann geeignete Harmonien zu erzeugen. Das Ziel besteht darin, den Kompositionsprozess von Filmmusiken durch die Erkennung der Emotion in einer bestimmten Szene zu verbessern.

1 Projektdaten

Fördersumme	34.960 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2023
Fakultät/Einrichtung	Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik Kompetenzzentrum OHM-UX
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann
Projektteam	Garri Steba Tom Schmid Roberto Murru Jonas Krug Felix Dennerlein
Kontakt Daten Projektleitung	alexander.vonhoffmann@th-nuernberg.de

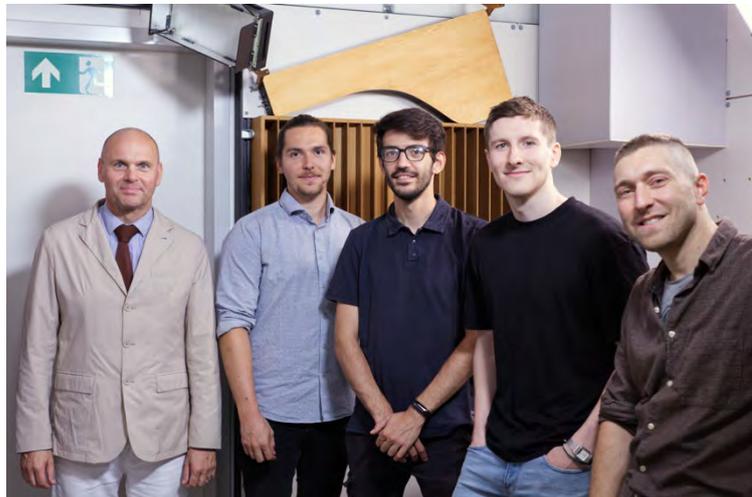


Abbildung 1: Projektteam: A. v. Hoffmann, T. Schmid, R. Murru, J. Krug, G. Steba ohne Felix Dennerlein. Bild: Oliver Lopez Forster [1]

2 Ausgangslage

Die Untermalung von Filmen mit teilweise automatisch generierter Musik ist nicht neu. Bereits im Jahr 1956 wurde der Soundtrack zum Science-Fiction Film „Alarm im Weltall“ (englischer Titel: „The Forbidden Planet“) teilweise mit einer Verschaltung von Modular-Synthesizern erzeugt, bei der stochastische Signale (zum Beispiel Rauschen) zufällig die für eine musikalische Tonfolge wichtigen Merkmale wie *Notenlänge*, *Tonhöhe*, *Timbre* und die *Hüllkurven* einzelner Töne bestimmen.

Durch den Komponisten wird nur noch der Wertebereich, auf den sich die steuernden stochastischen Signale auswirken, versuchsweise derart parametrisiert, dass sich ein stimmiges Ergebnis einstellt. Diese so erzeugte Musik wird auch „Krell Music“ genannt. Neu an dem in diesem Antrag verfolgten Ansatz ist, dass mit Sprach-Emotionserkennung die Sprachspuren der Schauspieler hinsichtlich des affektiven Inhalts in den Dimensionen „Valenz“ und „Arousal“ ausgewertet werden sollen. Die erzeugten Werte von „Valenz“ und „Arousal“ dienen – nach noch festzulegenden Strategien – der Parametrisierung der Notenlänge, der Tonhöhe, des Timbre, der Hüllkurven sowie weiteren Parametern wie zum Beispiel die Noten-Skala.

3 Ziele des Forschungsprojekts

Die in dem hier verfolgten Ansatz zu generierende Musik kann dem Genre „Drone“ zugeordnet werden. Es soll unter Verwendung von länger anhaltenden Klängen und Tonclustern mit relativ geringen harmonischen Abweichungen eine eher atmosphärische „Soundscape“ generiert werden, wie sie oft typisch für Filmmusik ist. Anders als im Leonardo-Projekt „Spirio Sessions“ wird nicht mit dem musikalischen Handeln eines Menschen durch eine KI (künstliche Intelligenz) interagiert, sondern es wird ein Algorithmus zur automatischen Musikerzeugung abhängig von in einem Sprachsignal enthaltenen, affektiven Inhalten parametrisiert. So könnte beispielsweise in Sprachdialogen mit positiver Valenz eine Dur-Skala automatisch gewählt werden, in anderen Film-Szenen mit negativer Valenz eine Moll-Skala. Zudem soll untersucht werden, inwieweit auf Vorarbeiten des MuseGAN-Projekts zur KI-gestützten Erzeugung von Musik aufgebaut werden kann. Die eigentliche Tonerzeugung soll in einem hybriden System aus sogenannten EURORACK-Hardwaresynthesizern und Synthese-orientierter Software wie „Reaktor“, „Max/MSP11“ oder „SonicPi“ erfolgen. Dazu soll ein bereits an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (kurz: Ohm) vorhandenes Modularsynthesizer-System um neue Module ergänzt werden (Abb. 2).



Abbildung 2: Audioarbeitsplatz mit Modularsynthesizer. Bild: Oliver Lopez-Forster

Für die Sprachemotionserkennung soll möglichst auf für die Ohm frei verfügbare Software zurückgegriffen werden, wie zum Beispiel openSMILE, MATLAB-Algorithmen oder ein modifiziertes „Wav2vec 2.0“-Verfahren. Diese Verfahren sollen anhand weniger Referenzfilmdialoge auf ihre Eignung hin untersucht werden.

Filmmusik soll den emotionalen Zustand des Betrachters beeinflussen. Deshalb wird im Rahmen dieses Vorhabens subjektiv überprüft, ob die erzeugten Harmonien zur emotionalen Intension des Dialogs passen. Das Vorhaben soll verhaltens- beziehungsweise kognitionswissenschaftliche Erkenntnisse liefern, die Antworten auf Fragen mit Bezug zu Erforschung der Benutzererfahrung (UX) geben: Wie kann mit Tönen die emotionale Stimmung des Benutzers beeinflusst werden? Hier bestehen Anknüpfungspunkte an die laufende Forschung des Antragsstellers zur Auslegung von Warn- und Hinweistönen, insbesondere an das abgeschlossene Leonardo-Vorgängerprojekt „Emotion AI“.

4 Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Zwei Studierende wurden im Sommersemester 2023 neben ihren Abschlussarbeiten als studentische Hilfskräfte für das Projekt eingestellt, um auf verschiedenen Wegen die Sprachemotionserkennung und computergenerierte Erzeugung von Sounddrones umzusetzen. Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Emotionsklassifizierungs-Metriken: eine Sechs-Emotionen-Metrik (Furcht, Neutral, Traurigkeit, Glück, Gefahr und Überraschung) nach Ekman [2] und die Valenz/Erregung/Dominanz-Metrik [3].

Es hat sich erwiesen, dass Python (Methode A) und Matlab (Methode B) als Framework für dieses Vorhaben praktikabel sind. Python ermöglicht die Nutzung des Modells *wav2vec2-large-robust-12-ft-emotion-msp-dim*, das bereits für die Speech Emotion Recognition feinabgestimmt wurde. Mit Matlab kann das bestehende KI-Modell (Bidirectional Layer Short-Term Memory (BiLSTM)) network trainiert werden, für das ein geeignetes Datenset verwendet werden muss. Nach einer Versuchsreihe konnten mit dem Datenset Audio-Visual Expressed Emotion (SAVEE) die besten Ergebnisse erzielt werden. [4]

Die beiden unterschiedlichen Verfahren wurden auf vier Filmszenen angewandt und das Ergebnis von Probandinnen und Probanden hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Die Umfrage war anonym und wurde online von 30 Teilnehmenden durchgeführt. Abbildung 3 zeigt anhand des Films Pulp Fiction [4] die erzeugten Harmonien durch Methode A und Methode B.

Die Eignung wird quantitativ anhand eines bidirektionalen Bewertungssystems (-60 (Methode A) bis +60 (Methode B)) überprüft. Dieses Bewertungssystem ist aus den Empfehlungen der ITU (Internationale Fernmeldeunion) BS.1284: „General methods for the subjective assessment of sound quality“ [5] abgeleitet. Beide Modellbewertungen werden im Rahmen eines einheitlichen Sounddesigns durchgeführt und gewährleisten daher unvoreingenommene Bewertungsbedingungen. Durch diese Methodik wird die



„Suitability“ folglich direkt geprüft und statistisch mit einem T-Test verifiziert.

Abbildung 3: Erzeugte Harmonien durch SER anhand des Beispiels "Pulp Fiction" [4].

Es konnte ermittelt werden, dass Methode A besser für die Generierung von Harmonien geeignet ist, wenn die Parameter durch SER-Algorithmen erzeugt wurden. In Abbildung 4 [4] sind die Ergebnisse der vier Szenen (1. The Truman Show, 2. Interstellar, 3. Pulp Fiction, 4. Good Will Hunting) als Boxplot-Diagramm dargestellt. Den Verschiebungen des Mittelwerts bei Szene 1 und 4 konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden, womit sie aus der jeweiligen Grundgesamtheit stammen, die das arithmetische

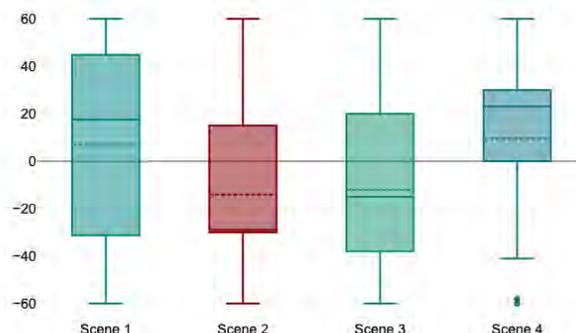


Abbildung 4 Ergebnisse der Online-Umfrage [4]

Mittel $\bar{x} = 0$ (keine dominierende Methode) tragen. Methode A scheint durch die größere Variabilität der Parameter dynamischere Harmonien zu erzeugen, die dem Probanden ein passenderes Gesamtbild der Szene suggerieren.

Eine ausführliche Dokumentation der Herangehensweise und der Forschungsergebnisse findet sich in der Veröffentlichung "AI Generated Music Using Speech Emotion Recognition" [4], die online (Open-Access) einsehbar ist.

Das Vorhaben konnte inhaltlich wie bei der Beantragung geplant durchgeführt werden. Durch die Erzeugung einer Schnittstelle unter Verwendung des MIDI-Protokolls konnte somit eine nahezu Echtzeit-Sounddesignlösung (zwei Sekunden Latenz durch Analysefenster der SER) mit dem konfigurierten Modularsynthesizer (Abb. 2), dem Endorphin.es-Shuttle und den SER-Algorithmen erzeugt werden.

5 Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Dieses Vorlaufforschungsprojekt war von Beginn an auf Nachhaltigkeit der investierten TH-Mittel ausgerichtet. Auf diese Aktivitäten soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Anlässlich der Feierlichkeiten zum Jubiläumsjahr hatte im Sommer 2023 die Ohm den Pop-up-Store „Ohm City“ im Augustinerhof 3 eingerichtet. Dieser Pop-up-Store wurde mit Ergebnissen aus diesem Vorlaufforschungsprojekt und dem Lehrforschungsprojekt „Drumactor“ mit der in das Nürnberg Digital Festival 2023 eingebundenen Veranstaltung „Pegnitzwaves“ am 4. Juli 2023 bespielt. Die Veranstaltung war ausverkauft und bis auf den letzten Sitzplatz belegt. Der Mitschnitt der Quadrophonium Performance wurde auf dem Youtube-Kanal der Hochschule veröffentlicht [6].

Diese Veranstaltung lieferte vielfältigen Anlass zur Berichterstattung in den Medien:

- Die Nürnberger Nachrichten berichteten am Samstag, dem 17. Juni 2023 auf Seite 7 im Kulturteil mit dem Artikel „Die KI macht den Klang“ über dieses Vorlaufforschungsprojekt
- Am 5. Juli 2023 sendete der Bayerische Rundfunk einen 3:37-minütigen Radiobeitrag über dieses Vorlaufforschungsprojekt.

In folgenden hochschuleigenen Formaten konnte über die Forschungsarbeiten berichtet werden:

- Prof. von Hoffmann nahm an einer Podiumsdiskussion „Artistic Intelligence – Ein Gespräch zur Zukunft von KI in Kultur“ bei der Veranstaltung „Artistic Intelligence – AI in Culture and Arts“ am 28. Juni 2023 im LEONARDO teil.
- Im Ohm Journal (02/2023) erscheint auf Seite 52 der Artikel „Hier spielt die KI“ über dieses Vorlaufforschungsprojekt. [1]

Erste Erkenntnisse zur Sprachemotionserkennung aus diesem Vorlaufforschungsprojekt geben Anlass für die Vorbereitung weiterer Antragstellungen in folgenden Förderlinien:

- Bereits im Mai 2023 wurde der Förderantrag „Catalyst: Engineering Solutions for Health (CES4H)“ (Sprecher des Forschungsschwerpunkts: Prof. Dr. Korbinian Riedhammer) im Programm zur Förderung der angewandten Forschung und Entwicklung an Hochschulen für angewandte Wissenschaften und Technischen Hochschulen in der Säule II „Forschungsschwerpunkte zum Ausbau von Forschungsstrukturen“ eingereicht, in dem unter anderem die Emotionserkennung in medizinischen Anwendungen Antragsgegenstand war.
- Es laufen gegenwärtig mit einem deutschen KMU (kleine und mittlere Unternehmen) Sondierungen für eine BMBF-Antragsstellung in der Förderlinie „KMU: Innovativ“ im Jahr 2024 für Anwendungen der Sprachemotionserkennung in der Mensch-Maschine-Interaktion mit Tönen.

Ebenfalls wurde die Veröffentlichung von wissenschaftlichen Arbeiten aus diesem Projekt konsequent verfolgt:

- Der Beitrag „Quadrofonium: Real-Time generation of abstract spatial soundscapes, sound-objects and drone-based music using a quadraphonic hybrid modular synthesizer“ wurde im Februar 2023 zur Klingtgut (KLG2023) Tagung in Hamburg (18.05 bis 20.05.23) eingereicht. Der Veranstalter, die Fakultät Design, Medien und Information (DMI) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften musste allerdings die Tagung aufgrund eines Hackerangriffes leider vollständig absagen.
- Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes wurden in einer insgesamt neunseitigen englischsprachigen wissenschaftlichen DOI-Veröffentlichung mit dem Titel „AI Generated Music Using Speech Emotion Recognition“ dokumentiert [4].

Das Vorlaufforschungsprojekt hat zudem erfolgreich zur Vernetzung beigetragen:

- Hochschulintern hat das Projekt sehr zu einer Verstärkung der Zusammenarbeit der Fakultäten „Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik“ (efi) und „Design“ in den Themenbereich „Sounddesign“ und „Audio“ beigetragen
- National wurde mit einem Vortrag des Projektteams am 20./21. Juni 2023 in einem internen Seminar bei Kollegen der Filmuniversität Babelsberg bei Berlin das akademische Netzwerk erweitert
- In das Projekt wurde als studentische Hilfskraft (SHK) ein ERASMUS-Masterstudierender der Universität Cagliari (Italien) eingebunden und ein Kollege dieser Partneruniversität auch in eine gemeinsame wissenschaftliche Veröffentlichung integriert. Damit hat dieses Vorlaufforschungsprojekt auch die Internationalisierung der TH-Nürnberg unterstützt.

Von den im Rahmen der Vorlaufforschung bewilligten Mitteln wurden nicht nur die Personalkosten für die studentischen Hilfskräfte (SHK) und Reisekosten beglichen, sondern es wurde auch in Laborausrüstung wie zum Beispiel ein modulares Synthesizer-System, ein professionelles 5.1-Surround-Lautsprecher-System und weitere Soft- und Audio-Hardware investiert, die nun auch für weitere Vorhaben über das Vorlaufforschungsprojekt hinaus zur Verfügung steht.

6 Literatur

- [1] „230458-ohm-journal-2023-02-6k-web-150dpi.pdf“. Zugegriffen: 23. November 2023. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.th-nuernberg.de/fileadmin/abteilungen/kom/kom_docs/OHM-Journal/230458-ohm-journal-2023-02-6k-web-150dpi.pdf
- [2] Ekman, P. (1992). Facial Expressions of Emotion: New Findings, New Questions. *Psychological Science*, 3(1), 34-38. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1992.tb00253.x>
- [3] A. Mehrabian und J. A. Russell, „An approach to environmental psychology“, 1974. [Online]. Verfügbar unter: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:143333487>
- [4] Murru, Roberto ; Krug, Jonas ; Schmid, Tom ; Steba, Garri ; Giacinto, Giorgio ; von Hoffmann, Alexander: AI Generated Music Using Speech Emotion Recognition.
<https://doi.org/10.34646/thn/ohmdok-1201>
- [5] BS.1284 : General methods for the subjective assessment of sound quality. URL <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1284/en>.
- [6] Pegnitzwaves auf dem Nürnberg Digital Festival (Dolby® Surround 5.1), (13. Juli 2023). Zugegriffen: 23. November 2023. [Online Video]. Verfügbar unter:
<https://www.youtube.com/watch?v=6nY6mEoh8d4>

Impressum

Vorlaufforschung 2023

Herausgeber:

Der Präsident der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Keßlerplatz 12

90489 Nürnberg

Redaktion und Layout:

Hochschulkommunikation

Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Stand: Juli 2024

