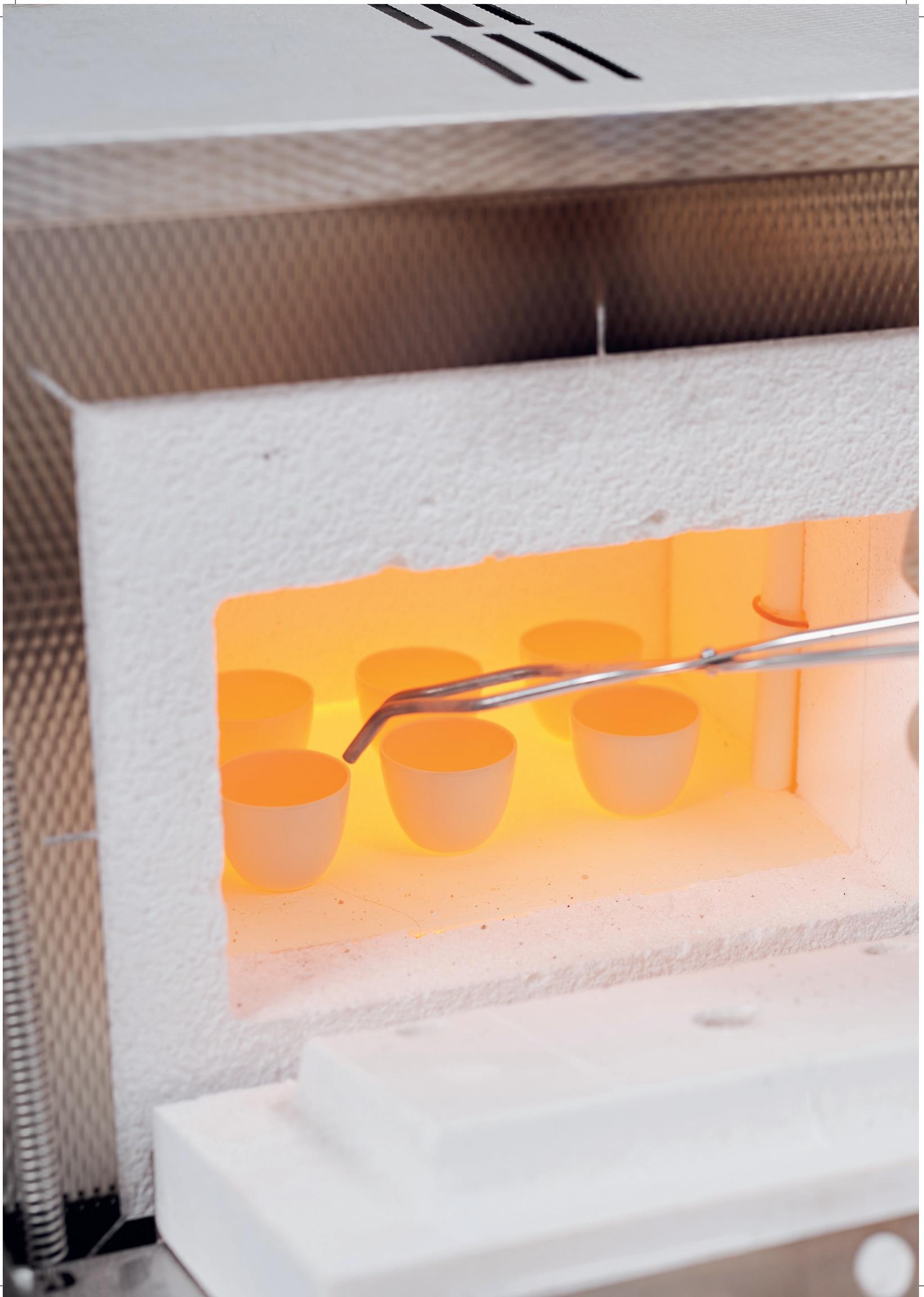




Vorlauftforschung 2021

Schriftenreihe

Hrsg.: Der Präsident der TH Nürnberg, Prof. Dr. Niels Oberbeck



A close-up photograph of a person's hand holding a pair of glasses. The hand is positioned in the foreground, with the fingers gripping the temples of the glasses. The background is slightly out of focus, showing a wooden cabinet with a woven texture and a dark, textured surface, possibly a book cover or a folder. A circular light blue overlay is centered over the image, containing the text.

Vorlauftforschung
der TH Nürnberg
2021

Vorlaufforschung

Editorial

Prof. Dr. Tilman Botsch
Vizepräsident für Forschung und Transfer

Berichte zur Vorlaufforschung

Liebe Leser*innen,

ein ansehnlicher Band mit wissenschaftlichen Untersuchungen aus ganz unterschiedlichen Fachgebieten liegt vor Ihnen und lädt zum darin Schmökern und zum Verweilen bei dem einen oder anderen Projekt ein. 14 Projekte konnten im Jahr 2021 gefördert werden und wieder zeigen die hier veröffentlichten 11 Ergebnisberichte sowohl die thematische Breite unserer Hochschule als auch die wissenschaftliche Tiefe, mit der die einzelnen Akteure unterwegs sind. Der Klimawandel und die Pandemie spielen bei den Untersuchungen genauso eine Rolle wie Künstliche Intelligenz und die Untersuchung von Werkstoffen, wie zum Beispiel bioaktivem Glas, klebrigen Schmierfetten oder menschlichen Knochen.



2013 erstmals initiiert, hat sich die Vorlaufforschung zwischenzeitlich an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm sehr gut etabliert und bietet forschungsaktiven Professor*innen die Möglichkeit, eine Idee auf dem Weg zu einem förderfähigen Konzept zu unterstützen. Die jährliche Ausschreibung richtet sich dabei sowohl an Neuberufene oder bislang erst wenig in der Forschung aktive Professor*innen als auch an bereits vergleichsweise gut etablierte Forschende, die ggf. auch schon in Instituten unserer Hochschule organisiert sind. Für das Jahr 2021 haben insgesamt 32 Professor*innen einen Antrag auf Förderung ihres jeweiligen Projekts gestellt. Wie in den vergangenen Jahren bewertete eine interdisziplinär aus Mitgliedern des Sachverständigenausschusses Wissens- und Technologietransfer sowie weiteren Professor*innen zusammengesetzte Begutachtungsgruppe die eingegangenen Anträge und wählte 2021 vierzehn Projekte für eine Förderung aus. Damit wurden 462.243 Euro für die Bearbeitung der Vorlaufforschungsprojekte bewilligt.

Der Erfolg der Vorlaufforschung zeigt sich nicht nur in den im vorliegenden Band zusammengefassten Berichten. Neben diesen Artikeln entstehen im Allgemeinen eine ganze Reihe weiterer Veröffentlichungen und durch die Weiterentwicklung der Ideen konnten mehrere erfolgreiche Förderanträge bei öffentlichen Fördermittelgebern gestellt werden. Um diese erwünschten Auswirkungen zu quantifizieren, wurden Anfang 2022 alle Projektleiter*innen befragt, die in den Jahren 2016 bis 2021 ein Vorlaufforschungsprojekt durchgeführt hatten. Die Evaluation ergab unter anderem, dass als Folge der in der genannten Zeitspanne für die Vorlaufforschung eingesetzten finanziellen Mitteln eine mehr als fünf Mal so große Summe an Drittmitteln von den jeweiligen Forschenden akquiriert werden konnte. Ein äußerst erfreuliches Ergebnis, das die Wirksamkeit der Vorlaufforschung eindrucksvoll unterstreicht.

Einen solchen Erfolg wünschen wir natürlich auch den Wissenschaftler*innen, 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 Lesen. 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 der TH Nürnberg 2021

Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung	8
Prof. Dipl.-Ing. Berthold Best, Helena Angerer, M. Eng. Fakultät Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Nürnberg	
Nanopore-Mikrobiom – Optimiertes Verfahren für hochauflösende Mikrobiom- analysen durch Nanopore-Sequenzierung	18
Prof. Dr. Ronald Ebbert Fakultät Angewandte Chemie, Technische Hochschule Nürnberg	
Biophilic City Design in Urban Planning: Building resilience to pandemics and climate change	30
Prof. Dr. Birgit Eitel Fakultät Betriebswirtschaft, Technische Hochschule Nürnberg	
DynoSpec – Hochdynamische spektroskopische Gasanalyse für umweltschonende Verbrennungsprozesse	34
Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht, Dr. Roman Kruglov Polymer Optical Fiber Application Center (POF-AC), Technische Hochschule Nürnberg	
Arbeitsmarktwirkungen und der Einsatz von Kurzarbeit in der COVID-19- Pandemie in Deutschland: Handelt es sich hierbei um eine notwendige Stabilisierungsmaßnahme oder wird dadurch ein überfälliger Strukturwandel beeinträchtigt?	42
Prof. Dr. Hans-Dieter Gerner Fakultät Betriebswirtschaft Prof. Dr. Lutz Bellmann Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Dr. Marie-Christine Laible Bundesamt für Migration und Flüchtlinge, Nürnberg	

Bioaktives Glas zum Knorpelersatz	48
Prof. Dr. Markus Hornfeck Fakultät Werkstofftechnik, Institut OHM-CMP, Technische Hochschule Nürnberg	
„Klebrigkeit“ von Schmierfetten	56
Prof. Dr. Karl-Heinz Jacob Fakultät Angewandte Chemie, Technische Hochschule Nürnberg	
Entwicklung eines KI-basierten EMS zur bidirektionalen Lastflexibilisierung von E- Fahrzeugflotten	70
Prof. Dr. Günter Kießling Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, Technische Hochschule Nürnberg	
Machbarkeitsstudie zur Herstellung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren durch Hydrothermal-Synthese	84
Prof. Dr. Wolfgang Krömer, M. Eng. Daniela Sappa, M. Eng. Felix Kugler, M. Eng. Jan Sebastian Hildebrand, B. Eng. Maximilian Kuschmierz Fakultät Werkstofftechnik / Energie Campus Nürnberg / EnCN, Technische Hochschule Nürnberg	
LitterPicker – Entwicklung eines Verbundsystems für die Erkennung und Beseitigung von Müll auf öffentlichen Straßen, Fußwegen und in Parks	108
Prof. Dr. Stefan May, M. Sc. Marco Masannek Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, Technische Hochschule Nürnberg	
Osteo-Flex – Flexoelektrizitätunterstützte Knochenheilung	118
Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou, Anna Titlbach, M. Sc., Ina Schmidt, M. Sc. Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, Technische Hochschule Nürnberg	



© Helena Angerer

Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung

Prof. Dipl.-Ing. Berthold Best
Fakultät Bauingenieurwesen
Technische Hochschule Nürnberg

Helena Angerer, M. Eng.
Fakultät Bauingenieurwesen
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

In dem Projekt „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ wurde die Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik betrachtet. Dazu wurde die vertikale Beschleunigung eines Fahrzeugs während der Fahrt gemessen. Die erzeugten Video-, GPS- und Beschleunigungsdaten wurden miteinander synchronisiert und anschließend ausgewertet. In den Beschleunigungsdaten wurde die Ausdehnung der Schadensmerkmale in Längsrichtung ersichtlich und der Einfluss der Längsbeschleunigung auf die vertikale Beschleunigung des Fahrzeugs wurde aufgedeckt.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Bauingenieurwesen
Projektleitung	Prof. Berthold Best, Helena Angerer M. Eng.
Kontaktdaten	berthold.best@th-nuernberg.de helena.angerer@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Aktuell erfolgt bei Kommunen eine periodische Erfassung und Bewertung der Zustände der Längs- und Querunebenheit, der Oberflächenschäden und der Griffigkeit der Oberfläche mittels messtechnischer und visueller Zustandserfassung. Durch die periodische Erfassung fehlt der kontinuierliche Überblick über die Zustandsentwicklung der Straße. Die Erfassungsmethoden einer Kommune wurden von Außerortsstraßen auf die Straßen innerorts übertragen. Dies ist insofern ungeeignet, da sich die Zustände innerorts schneller ändern als außerorts und die Erfassung in personeller und finanzieller Hinsicht ein zu großer Aufwand für die Kommunen ist [1].

Mit einer alternativen Methode zur Straßenzustandserfassung kommunaler Straßen könnte der Zustand dieser kontinuierlich erfasst werden. Ziel ist es, langfristig gesehen, ein kostengünstiges Messsystem zu entwickeln, welches die Straßenzustandserfassung im kommunalen Raum bewerkstelligt. Die Daten sollen zur Straßenzustandsbewertung dienen und anschließend in die Erhaltungsplanung einbezogen werden. Auf diesem Weg wäre es möglich, das Erhaltungsmanagement der Kommunen zu unterstützen und durch optimierte Erhaltungsmaßnahmen und geringen personellen Einsatz Kosten zu sparen.

Als alternative Methode wird im Rahmen des Forschungsprojektes die Straßenzustandserfassung mittels Beschleunigungssensorik betrachtet. Dazu wird die vertikale Beschleunigung eines Fahrzeuges während der Fahrt gemessen. Bisher wurden Testfahrten zur Datenbeschaffung mit dem VW T5 der Fakultät Bauingenieurwesen durchgeführt. Dabei wurde die vertikale Beschleunigung im Innenraum des Pkw mit einem Smartphone sowie einem USB-Beschleunigungssensor aufgezeichnet. Zur optischen Verifizierung des Straßenzustandes war stets eine Kamera auf die Straße gerichtet. Der Schwerpunkt der Untersuchungen beschränkte sich zunächst auf die Bildreferenzierung der Beschleunigungswerte, um das Beschleunigungsprofil mithilfe des Bildmaterials validieren zu können. Zur Einordnung des Beschädigungsgrades wurden die Festlegung von Beschleunigungsgrenzwerten anhand einer klassischen visuellen Zustandserfassung angestoßen sowie Untersuchungen zur Op-

timierung des Messaufbaus durch erneute Testfahrten mit dem VW T5 der TH Nürnberg durchgeführt. Nachdem die grundsätzliche Machbarkeit der Straßenzustandserfassung mittels Erschütterungssensorik nachgewiesen wurde, wurde das neue Messverfahren von der wirtschaftlichen Seite betrachtet, um den Vorteil für Kommunen zu verdeutlichen. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass das neue Verfahren später in der Praxis Akzeptanz finden würde und auch zur Anwendung kommen könnte.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das langfristige Ziel des Forschungsprojektes ist es, die Straßenzustandserfassung mit einer alternativen Methode zu ermöglichen. Das resultierende Messsystem soll beispielsweise in dem Fahrzeugpool einer Kommune installiert werden und dann bei ohnehin anfallenden Fahrten die Straßenzustandsdaten aufzeichnen. Die Daten sollen an eine Cloud übermittelt, automatisch ausgewertet und aufbereitet zur Verfügung gestellt werden.

Um diesem finalen Ziel näher zu kommen, wurden während der Laufzeit der Vorlaufforschung folgende Teilziele verfolgt:

- Synchronisierung der verschiedenen Daten (Video-, GPS- und Beschleunigungsdaten)
- Messfahrten und Auswertung
- Ausdehnung der Schäden in Längsrichtung
- Einfluss der Längsbeschleunigung auf die vertikale Beschleunigung

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Synchronisierung der verschiedenen Daten (Video-, GPS- und Beschleunigungsdaten)

Während der Bildreferenzierung mit den Daten der GoPro wurde festgestellt, dass in den Metadaten der Videos nicht nur GPS-Daten, sondern auch Beschleunigungsdaten enthalten sind. Wenn die GoPro wie bisher das Video und die GPS-Daten und zusätzlich noch die Beschleunigungsdaten aufnehmen kann, könnten weitere Schritte wie die Synchronisierung der verschiedenen Daten erleichtert werden, wenn nicht sogar entfallen. Dementsprechend wurde die Eignung der GoPro als Messsystem geprüft [2]. Das Video wird von der GoPro als MP4-Datei abgespeichert. Mit einer webbasierten Anwendung werden aus der MP4-Datei weitere Daten extrahiert [3]. Es werden eine CSV-Datei mit den Beschleunigungsdaten und eine CSV-Datei mit den GPS-Daten erstellt. Die webbasierte Anwendung verfügt nur über die Möglichkeit, beide Datenpakete in zwei einzelnen Tabellen auszugeben. Die Beschleunigungsdaten sind demnach noch nicht mit den GPS-Daten synchronisiert. Die untenstehende Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt der Beschleunigungsdaten als Rohdaten:

```
"cts","date","Accelerometer [m/s2]","1","2","temperature [°C]"
"116.009","2021-11-25T12:42:30.116Z","10.24220623501199","0.4244604316546763","0.0407673860911271","16.927734375"
"121.08482741116751","2021-11-25T12:42:30.121Z","10.045563549160672","0.1223021582733813","0.21103117505995203","16.927734375"
"126.16065482233502","2021-11-25T12:42:30.126Z","9.94484412470024","-0.31654676258992803","0.24940047961630696","16.927734375"
"131.23648223350253","2021-11-25T12:42:30.131Z","8.973621103117505","-0.05755395683453238","0.2014388489208633","16.927734375"
"136.31230964467005","2021-11-25T12:42:30.136Z","8.815347721822542","-0.019184652278177457","0.2565947242206235","16.927734375"
```

Abb. 1: Rohdaten Beschleunigung (Bild: Helena Angerer)

„cts“ ist ein Zeitstempel in Millisekunden, basierend auf dem Zeitstempel der MP4-Daten. Dies muss bei der webbasierten Anwendung sowohl bei den Beschleunigungsdaten als auch bei den GPS-Daten ausgewählt werden, damit der Zeitstempel cts mit dem Videomaterial übereinstimmt. Wenn dies beim Extrahieren beider Datensätze berücksichtigt wird, verfügen beide Dateien über den gleichen Zeitstempel. Unter dieser Voraussetzung ist es möglich, im späteren Verlauf die Beschleunigungsdaten und die GPS-Daten über den Zeitstempel „cts“ zu synchronisieren. Dies ist von Vorteil, da die Formatierung als Dezimalzahl für Berechnungen besser geeignet ist als das Format der Spalte „date“. Die Spalte „date“ beinhaltet das Datum und die Uhrzeit mit Stunden, Minuten, Sekunden und Millisekunden. Die nächsten drei Spalten zeigen Beschleunigungswerte in m/s^2 . Da die Beschleunigungswerte der ersten Spalte um einen Ruhewert von $9,81 m/s^2$ pendeln und die Erdbeschleunigung von $9,81 m/s^2$ dauerhaft auf die z-Achse wirkt, ist ersichtlich, dass es sich hierbei um die z-Achse der GoPro handelt. Durch kurze

Messungen konnte festgestellt werden, dass anschließend die x-Achse und dann die y-Achse aufgezeichnet werden. Die Anordnung der Achsen wird in Abbildung 2 dargestellt. Die letzte Spalte zeichnet die Temperatur auf und ist im Rahmen der Studie bisher irrelevant. Die Beschleunigungswerte von der GoPro werden mit einer Frequenz von bis zu 200 Hz aufgezeichnet.



Abb. 2: Achsen der GoPro (Bild: Helena Angerer)

Die GPS-Daten können durch die webbasierte Anwendung ebenfalls als CSV-Datei exportiert werden. Die Abbildung 3 zeigt den Beginn des Datenpakets:

```
"cts", "date", "GPS (Lat.) [deg]", "GPS (Long.) [deg]", "GPS (Alt.) [m]", "GPS (2D speed) [m/s]", "GPS (3D speed) [m/s]", "fix", "precision", "altitude system"
"74.905", "2021-11-25T12:42:30.074Z", "49.4037696", "11.053111", "318.09", "3.761", "3.93", "3", "129", "MSLV"
"129.7647894736842", "2021-11-25T12:42:30.129Z", "49.4037699", "11.0531081", "318.092", "3.778", "3.76", "3", "129", "MSLV"
"184.6245789473684", "2021-11-25T12:42:30.184Z", "49.4037702", "11.0531052", "318.086", "3.802", "3.78", "3", "129", "MSLV"
"239.4843684210526", "2021-11-25T12:42:30.239Z", "49.4037706", "11.0531024", "318.053", "3.819", "3.8", "3", "129", "MSLV"
"294.34415789473684", "2021-11-25T12:42:30.294Z", "49.403771", "11.0530996", "318.022", "3.78", "3.82", "3", "129", "MSLV"
```

Abb. 3: Rohdaten GPS (Bild: Helena Angerer)

Die ersten beiden Spalten „cts“ und „date“ sind identisch mit der Beschleunigungsdatei. Die beiden darauffolgenden Spalten beinhalten die geografischen Koordinaten. Die erste der beiden Spalten gibt den Breitengrad und die zweite den Längengrad als Dezimalgrad an. Dabei beziehen sie sich auf das geodätische Referenzsystem namens World Geodetic System von 1984 (kurz: WGS84) [4]. Die Koordinaten werden von der GoPro mit sieben Nachkommastellen aufgezeichnet. Die GPS-Datensätze werden mit einer Frequenz von bis zu 18 Hz aufgenommen.

Da die beiden Datenpakete, wie bereits in Abbildung 1 und Abbildung 3 dargestellt, in zwei getrennten Tabellen ausgegeben werden, müssen diese in einem weiteren Bearbeitungsschritt zusammengeführt werden. Dies ist notwendig, um die Daten anschließend in einem geografischen Informationssystem, wie beispielsweise QGIS, darstellen zu können. Dazu muss jeder Beschleunigungsdatensatz konkrete GPS-Werte besitzen. Da die Frequenz der Beschleunigungswerte höher ist als die Frequenz der GPS-Werte, werden die GPS-Werte über die Zeit (cts) linear interpoliert. Um die beiden CSV-Dateien in Excel einzulesen, aufzubereiten, in einer Tabelle zu verknüpfen und anschließend zu speichern, wurden mehrere Makros geschrieben. Diese Makros sind variabel auf alle CSV-Dateien anwendbar, sofern diese nach dem oben beschriebenen Verfahren mithilfe der webbasierten Anwendung generiert wurden.

Es lässt sich festhalten, dass die Messtechnik der GoPro, bezogen auf die Videoqualität, die Nachkommastellen und die Frequenzen der Beschleunigungs- und der GPS-Daten, auf Basis der bisher festgestellten Eigenschaften ausreichend ist. Negativ aufgefallen ist, dass der Anwender keine Einstellungen an dem Beschleunigungssensor vornehmen kann und auch sonst keine Informationen zu der verbauten Messtechnik erhält. Die Daten von der GoPro sind vorerst nicht synchronisiert, können im Nachhinein aber mit dem Makro noch synchronisiert werden. Durch das Makro beträgt der Zeitaufwand pro Messung nur noch eine halbe Minute. Dadurch sind alle Vorbereitungen getroffen, um Zustandsmerkmale einer Straße mit der GoPro aufzunehmen.

Messfahrten und Auswertung

Die GoPro wurde auf der Motorhaube des VW T5 befestigt. In den Einstellungen der GoPro wurde eine Auflösung von 4K bei 30 Bildern pro Sekunde mit einem linear eingestellten Objektiv ausgewählt. Die HyperSmooth-Funktion, welche das Bild stabilisiert, wurde absichtlich deaktiviert, um später die visuelle Aufnahme und die Ausschläge in dem Verlauf der Beschleunigungsdaten leichter verknüpfen zu können. Die GoPro wurde mit einem Smartphone verbunden, um die Aufnahme aus dem Innenraum des Fahrzeugs starten und stoppen zu können. Da die Messungen geschwindigkeitsabhängig sind [5], sollten die Aufnahmen mit einer annähernd konstanten Geschwindigkeit durchgeführt werden. Die Messungen wurden bei einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h durchgeführt. Um das natürliche Pendeln des Fahrers um die geplante Geschwindigkeit zu verringern, wurde nach dem Erreichen der Geschwindigkeit von 30 km/h der Tempomat aktiviert.

Da im Verlauf der Messungen dennoch Geschwindigkeitsschwankungen vorliegen und das Messfahrzeug zum Vorfahrt Gewähren stehen bleiben musste, ist es nicht sinnvoll, die Beschleunigungswerte in einem Diagramm über die Zeit darzustellen. Um die Geschwindigkeitsdifferenzen auszugleichen, muss aus der Geschwindigkeit v und der Zeit t erst die gefahrene Strecke s berechnet werden. Dadurch, dass im Stand die Geschwindigkeit gleich null ist, ist die zurückgelegte Strecke auch null. Werden die Beschleunigungsdaten in einem Diagramm über die Strecke dargestellt, werden beliebig viele Beschleunigungswerte aus dem Stand nur einem Wert auf der Achse der Strecke zugeordnet.

Um mehrere Messfahrten in ein gemeinsames Diagramm eintragen zu können, muss eine gemeinsame Kilometrierung gewählt werden. Unter der Annahme, dass bei allen drei Messfahrten der maximale Beschleunigungswert bei der Überfahrt über denselben Straßenschaden erzeugt wurde, kann die Kilometrierung anhand des maximalen Messwertes erfolgen. Die Messreihe, die bei dem maximalen Messwert die größte zurückgelegte Strecke aufweist, wurde als erstes gestartet. Um die anderen Messreihen auf die gleiche Kilometrierung zu bringen, wird auf jeden Streckenwert der anderen Messreihen so viel dazu addiert, dass die Werte der zurückgelegten Strecke beim maximalen Beschleunigungswert gleich sind. Der Bereich mit dem maximalen Messausschlag wird im nachfolgenden Diagramm dargestellt. Darunter befindet sich ein Videoausschnitt des vorliegenden Schadens an der Stelle des maximalen Ausschlags (siehe Abbildung 4).

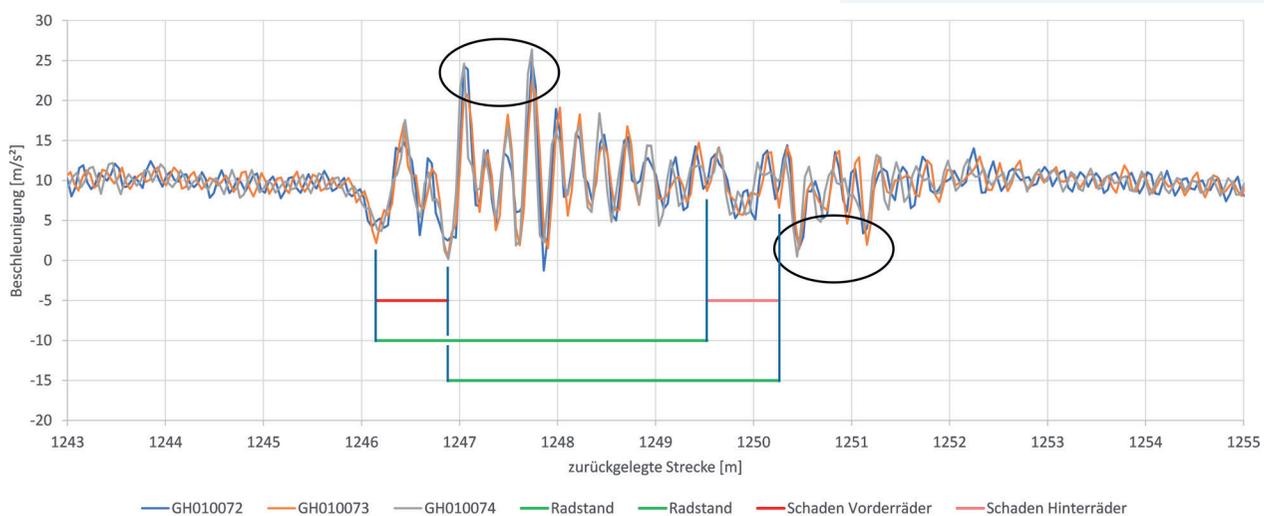


Abb. 4: Beschleunigungsdaten und Videoausschnitt im Bereich des maximalen Messausschlags (Bild: Helena Angerer)

Das Diagramm zeigt auf der y-Achse die Beschleunigungswerte und auf der x-Achse die zurückgelegte Strecke in Metern. Es zeigt den Verlauf der Beschleunigungsdaten aller drei Messfahrten über die Strecke von 1243 m bis 1255 m. Zu Beginn, von 1243 m bis 1246 m, pendeln die Beschleunigungswerte um den Ruhewert von $9,81 \text{ m/s}^2$. Anschließend wird der Verlauf durch den Straßenschaden angeregt und erreicht bei der Datenreihe aus dem Video GH010073 einen Tiefpunkt von $2,19 \text{ m/s}^2$ bei 1246,15 m. Der nächste, ähnlich stark ausgeprägte, Tiefpunkt von $0,34 \text{ m/s}^2$ befindet sich bei 1246,88 m. Der Abstand beider Punkte beträgt 0,73 m. Dies entspricht ungefähr der Ausbreitung des Schadens in Längsrichtung, welche tatsächlich zwischen 0,7 m und 0,8 m beträgt. Die bisherigen Schwingungen wurden nur durch die Überfahrt der beiden vorderen Reifen über den Schaden angeregt. Bei einem VW T5 mit einem langen Radstand beträgt dieser 3,4 m [6]. Folglich gibt es zwei weitere Extrema, welche durch die Überfahrt des Schadens auftreten. Ein Tiefpunkt liegt mit $8,71 \text{ m/s}^2$ bei 1249,52 m und ein weiterer mit $6,61 \text{ m/s}^2$ bei 1250,26 m. Der Abstand der beiden Tiefpunkte beträgt 0,74 m.

Der Abstand des ersten Tiefpunktes der Vorderräder zum ersten Tiefpunkt der Hinterräder beträgt 3,37 m und der Abstand des zweiten Tiefpunktes der Vorderräder zum zweiten Tiefpunkt der Hinterräder beträgt 3,38 m. Dies spiegelt den Radstand von 3,40 m wider.

Kritisch anzumerken ist, dass die Auswirkungen der Hinterräder auf den Verlauf der Beschleunigungen ohne weitere Kenntnisse in dem Diagramm nicht ersichtlich sind. Die geringen Auswirkungen können auf den großen Abstand der GoPro zu den Hinterrädern zurückgeführt werden. Interessant ist, dass sich die Beschleunigungen jeweils nach dem Überfahren des Schadens so überlagern, dass deutlichere Extrema entstehen. Diese Extrema sind in dem Diagramm in Abbildung 4 schwarz eingekreist. Die Abstände der Extrema spiegeln ebenfalls die Ausdehnung des Schadens in Längsrichtung und den Radstand des Messfahrzeugs wider. Diese überlagerten Extrema sind im Diagramm deutlich sichtbar. Angenommen, die Überlagerung ist kein Zufall, dann wäre dies eine erste Grundlage, um einen Schaden anhand der Beschleunigungsdaten identifizieren und dessen Ausdehnung in Fahrtrichtung ermitteln zu können.

Allgemein ist festzustellen, dass der Verlauf der Beschleunigungsdaten der drei Datenreihen nicht immer so synchron ist wie im eben betrachteten Abschnitt in Abbildung 4. Im weiteren Verlauf, gegen Ende der Messstrecke, weisen die Datenreihen einen unterschiedlichen Verlauf auf. In diesem Abschnitt befindet sich eine T-Kreuzung. Dadurch bedingt, wurden die Daten der drei Messreihen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des Fahrzeugs in y-Richtung aufgenommen. Um dies zu betrachten, werden in dem Diagramm in Abbildung 5 der Verlauf der Beschleunigungsdaten auf der Primärachse und die gefahrene Geschwindigkeit auf der Sekundärachse dargestellt.

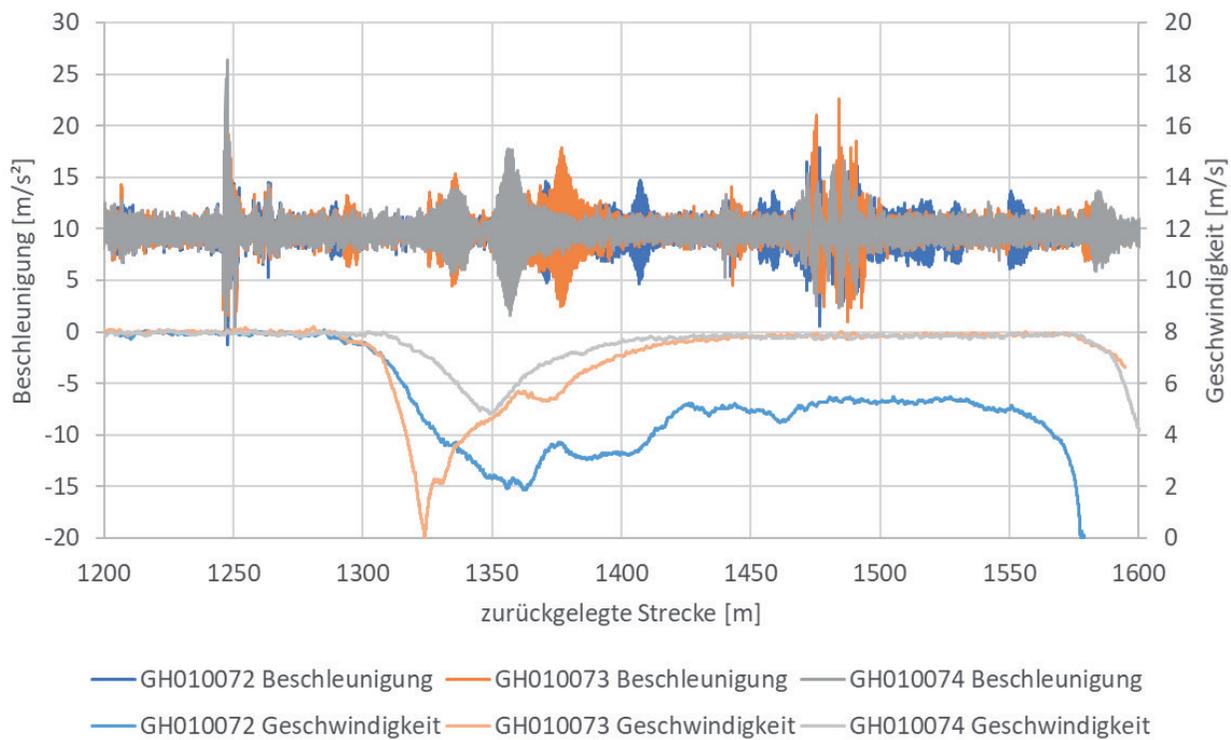


Abb. 5: Verlauf der Beschleunigungsdaten bei gefahrener Geschwindigkeit (Bild: Helena Angerer)

Der untere Graph zeigt den Verlauf der Geschwindigkeiten an. Im Bereich von 1200 m bis ca. 1275 m wurden alle drei Datenreihen noch mit der gleichen Geschwindigkeit aufgezeichnet. Anschließend folgt der Bereich der T-Kreuzung von 1275 m bis ca. 1450 m. In diesem Bereich weisen alle drei Datenreihen einen unterschiedlichen Verlauf der Geschwindigkeiten auf. Dieser Bereich wird im Folgenden noch genauer betrachtet. Da bei der ersten Messreihe die Geschwindigkeit nach der Kreuzung von der Geschwindigkeit der beiden anderen Messreihen abweicht, erfolgt die genaue Betrachtung des Kreuzungsbereiches in Abbildung 6 zur Vereinfachung anhand der Messreihe GH010073 (links) und der Messreihe GH010074 (rechts):

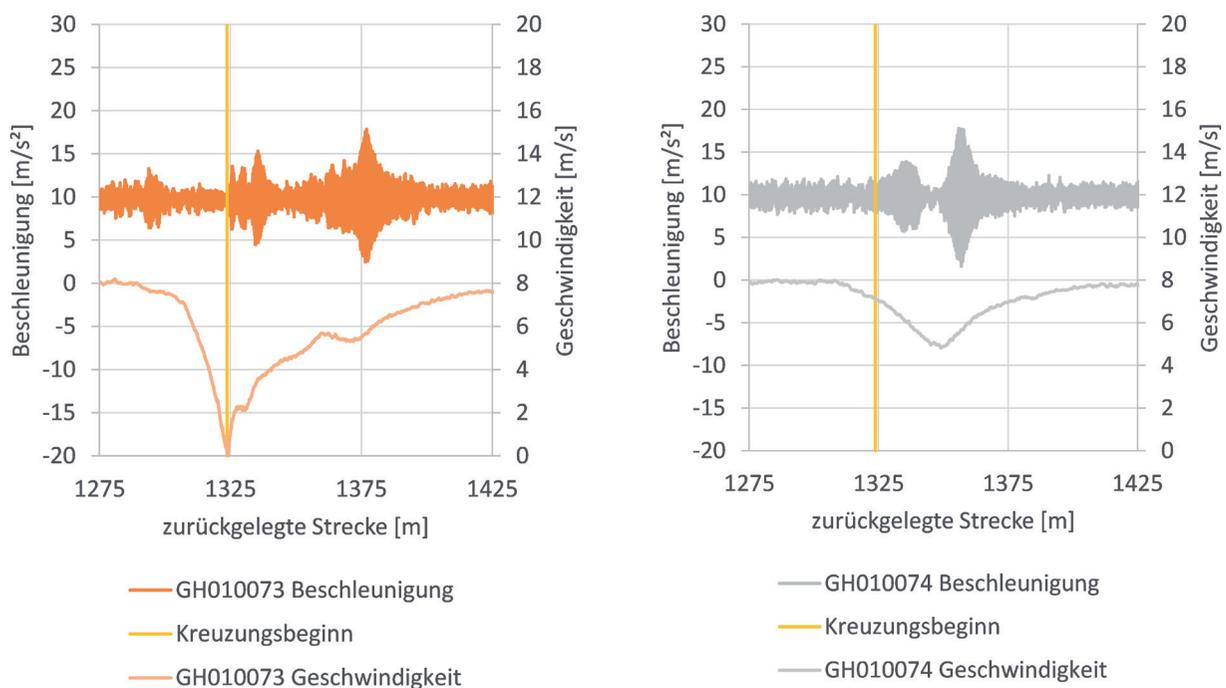


Abb. 6: Kreuzungsbereich bei der Messreihe GH010073 (links) und der Messreihe GH010074 (rechts) (Bild: Helena Angerer)

Da bei der Messreihe GH010073 (links) ein Lkw an der Kreuzung Vorfahrt hatte, musste das Messfahrzeug bis zum Stillstand abgebremst werden. Da dies vor der Kreuzung war, symbolisiert der Messwert mit einer Geschwindigkeit von 0 m/s den Kreuzungsbeginn und wird bei ca. 1324 m mit einem senkrechten Strich markiert. Um die Messfahrt fortzuführen, wurde im ersten Gang angefahren und das Messfahrzeug auf eine Geschwindigkeit von ca. 2 m/s beschleunigt. Daraus resultieren die ersten Ausschläge nach dem Kreuzungsbeginn. Um von dem ersten Gang in den zweiten Gang zu schalten, wurde die Kupplung betätigt. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Auto nicht mehr beschleunigt. Die Geschwindigkeit verringerte sich nur minimal, aber die Ausschläge im Beschleunigungsprofil sind ähnlich ausgeprägt wie bei der positiven Beschleunigung. Dies könnte daran liegen, dass die Beschleunigung im ersten Gang sehr stark ist und der Trägheitssatz Anwendung findet, wodurch die Ausschläge verstärkt werden. Sobald im zweiten Gang eingekuppelt wurde, wurde beschleunigt. Dies schlägt sich in den Messwerten in der dritten Gruppe der Ausschläge nieder. Die Beschleunigung im dritten Gang bildet die vierte und letzte Gruppe der Ausschläge.

Der Kreuzungsbeginn aus der vorherigen Messreihe wurde in das Diagramm der Messreihe GH010074 (rechts) übernommen. Dadurch ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit beim Einfahren in den Kreuzungsbereich verringert wurde und gegen Ende des Kreuzungsbereiches wieder erhöht wurde. Ein Schaltvorgang hat in diesem Fall nicht stattgefunden. Sowohl die negative als auch die positive Beschleunigung des VW-Busses in y-Richtung bilden eine Gruppe an Ausschlägen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass es in der Auswertung möglich war, aus den Beschleunigungsdaten Schadensmerkmale zu identifizieren. Auch die Ausdehnung eines Schadensmerkmals in Fahrtrichtung und der Radstand des Messfahrzeugs konnten aus den Beschleunigungsdaten abgeleitet werden. Es stellte sich jedoch auch heraus, dass nicht jeder Ausschlag im Beschleunigungsprofil ein Schadensmerkmal repräsentiert. Die vertikale Achse des Beschleunigungssensors reagiert auch auf die Längsbeschleunigung des Messfahrzeugs. Insgesamt eignet sich die Erschütterungssensorik zwar als alternative Methode zur Straßenzustandserfassung, allerdings besteht weiterer Forschungsbedarf, bevor sie in der Straßenzustandserfassung Anwendung finden kann. Bei dem weiteren Vorgehen sollte einerseits die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Messfahrzeugs weiter untersucht werden, andererseits müssen Beschleunigungsdaten von den unterschiedlichsten Straßenschäden aufgenommen und ausgewertet werden. Sollten diese Untersuchungen die bisherigen Erkenntnisse bestätigen, kann auf der Grundlage der Daten eine künstliche Intelligenz angelehrt werden. Für die weiteren Untersuchungen kann die GoPro durchaus verwendet werden. Allerdings hat sich im Rahmen des Forschungsprojektes „Alternative Methoden zur Straßenzustandserfassung“ gezeigt, dass es von Vorteil ist, wenn es weitere Informationen und Einstellmöglichkeiten bei dem Beschleunigungssensor gibt. Der Nachteil an der GoPro ist, dass es keinerlei Einstellmöglichkeiten und Informationen über die verbauten Komponenten gibt. Demnach ist es langfristig angebracht, ein eigenes Messsystem mit externen Sensoren aufzubauen.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Mit dem Projekt „Straßenzustandserfassung“ wurden wesentliche Grundlagen für die weitere Forschung im Rahmen des Asset Managements gelegt. Im Rahmen der Forschungsprofessur Asset Management an der Fakultät Bauingenieurwesen wird die Gesamtheit der Methoden der Zustandserfassung der Straßenbefestigung weiterentwickelt. Neben der Verbesserung bewährter, eingeführter Messmethoden liegt der Schwerpunkt bei der Entwicklung alternativer Methoden, die Vorteile hinsichtlich des Aufwandes bei finanziellen und personellen Ressourcen haben. Ebenso richtet sich die Weiterentwicklung auf die schnellere Bereitstellung der Messergebnisse, um einen effizienteren Einsatz der finanziellen Mittel zur Straßenerhaltung und eine höhere Verfügbarkeit der Infrastruktur zu ermöglichen.

Die mit dem Projekt untersuchte Sensortechnologie ist ein Erfolg versprechender Ansatz, die Forschungsziele zu erreichen. Die Sensortechnologie hat den Vorteil der einfachen Handhabung und der schnellen sowie kostengünstigen Verfügbarkeit. Damit eignet sie sich, bei häufig wiederkehrenden Zustandserfassungen, unter Umständen in wöchentlichen Intervallen, eingesetzt zu werden. Daher wird es Gegenstand weiterer Forschungsprojekte sein, Sensoren als Erfassungsmodul mit Auswertemodulen zu koppeln und die Messergebnisse mittels künstlicher Intelligenz auszuwerten und dem Nutzer, in der Regel dem Straßenbaulastträger, als ein einheitliches Modul zur Verfügung zu stellen.

Die differenzierte Anwendung dieses Verfahrens wird derzeit ebenfalls an der australischen Partnerhochschule der TH Nürnberg, der RMIT University in Melbourne, in einem kommunalen Straßennetz erprobt. Dort wird dies im Rahmen einer Promotion entwickelt, die ebenfalls von der TH Nürnberg begleitet wird. Die Anwendung des Verfahrens der Straßenzustandserfassung mittels Erschütterungssensorik soll weiter auf den deutschen Richtlinienstandard hin entwickelt werden. Dazu ist eine Promotion an der TH Nürnberg geplant.

6. Literatur

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hg., „Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012)“, Köln, 2012.
- [2] H. Angerer, „Eignung der GoPro als alternatives Messsystem zur Straßenzustandserfassung“. Ingenieurwissenschaftliche Studie, Nürnberg, 8. Dez. 2021.
- [3] Telemetry Overlay S. L., *Telemetry Extractor for GoPro (Lite)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://goprotelemetryextractor.com/free/> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [4] Coordinates-converter.com, *Erklärung zu geographischen Koordinaten, Umwandlung und Berechnung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.koordinaten-umrechner.de/info> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).
- [5] A. Shtayat, S. Moridpour und B. Best, „Using e-bikes and private cars in dynamic road pavement monitoring“, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2021, doi: 10.1016/j.ijst.2021.03.004.
- [6] Volkswagen Nutzfahrzeuge, *Der neue Transporter, Preisliste und Technische Daten, Gültig für das Modelljahr 2016*. [Online]. Verfügbar unter: <http://docplayer.org/20533471-Preisliste-und-technische-daten-gueltig-fuer-das-modelljahr-2016-der-neue-transporter-nutzfahrzeuge.html> (Zugriff am: 15. Dezember 2021).

Nanopore-Mikrobiom – Optimiertes Verfahren für hochauflösende Mikrobiom- analysen durch Nanopore-Sequenzierung

Prof. Dr. Ronald Ebbert
Fakultät Angewandte Chemie
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Ziel des Projektes ist die Optimierung einer Methode zur Bestimmung aller in einer Probe enthaltenen Mikroorganismen durch Sequenzierung mit dem Oxford-Nanopore-System, um z. B. die Besiedlung des Darms von Neugeborenen untersuchen zu können. Durch die Entwicklung eigener Reagenzien (Primer) wurde das Spektrum der nachweisbaren Bakterien drastisch erweitert, sodass z. B. alle wichtigen Darmbakterien analysiert werden können. Darüber hinaus wurde ein Verfahren zur universellen Detektion von Pilzen etabliert. Die großen Mengen erzeugter Daten können durch einen neu etablierten bioinformatischen Workflow nachvollziehbar und standardisiert ausgewertet werden. Die Kombination der Sequenzierungsergebnisse mit nur einem zusätzlichen qPCR-Experiment erlaubt die absolute Quantifizierung der enthaltenen Zellzahlen. Zwei auf den Ergebnissen aufbauende Folgeprojekte beginnen bereits.

1. Projektdaten

Fördersumme	29.700 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Angewandte Chemie
Projektleitung	Prof. Dr. Ronald Ebbert
Kontaktdaten	ronald.ebbert@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die Besiedlung des Darmes von Neugeborenen kann die Gesundheit und Entwicklung des Kindes stark beeinflussen. Die Gesamtheit der Mikroorganismen, das Darmmikrobiom, reagiert auf eine Vielzahl externer Einflüsse, wie Geburtsmodus, Ernährung, Medikationen etc. Gerade die Gabe von Antibiotika ist häufig zur Vermeidung von Infekten nötig, stört aber die Ausbildung einer intakten Darmflora. Eine genaue Kenntnis des Darmmikrobioms kann helfen, die Auswirkungen von Ernährung und Medikationen besser zu verstehen und diese Maßnahmen zum Wohl der Patienten weiterzuentwickeln. Im Rahmen des von der Staedtler-Stiftung geförderten Projektes „Molekulare Identifizierung und Quantifizierung von Mikroorganismen in der Mikrobiota von Neugeborenen“ wurde in Zusammenarbeit mit der Kinderklinik des Klinikums Nürnberg (Leitung: Prof. Dr. C. Fusch) eine Methode zur Untersuchung des Darmmikrobioms von Neugeborenen mittels quantitativer PCR (qPCR) etabliert. Dieses Verfahren ermöglicht es, die absolute Menge der in Stuhlproben enthaltenen Bakterien zu ermitteln, wobei insgesamt 11 Bakteriengruppen und die Gesamtzahl der Pilze bestimmt werden. Diese Daten geben wertvolle Informationen über den Gesundheitszustand der Patienten, indem sie z. B. Fehlbesiedlungen des Darmes anzeigen können.

Gegen Ende des Projektes konnte in ersten Versuchen gezeigt werden, dass durch die seit Kurzem verfügbare Methode der DNA-Sequenzierung mit Nanoporen prinzipiell noch deutlich vielfältigere Daten erhalten werden können. Im hier betrachteten Fall wurde die bei allen Bakterien konservierte 16S-rDNA-Region durch eine PCR-Reaktion vervielfältigt und die DNA-Sequenz aller so entstandenen Produkte mit dem Nanopore-Sequenzierer ermittelt. Auf diese Weise kann theoretisch jede einzelne enthaltene Art durch Vergleich der Daten mit einer Se-

quenzdatenbank identifiziert und die Zahl der entstandenen Produkte bestimmt werden. Auch im Rahmen einer Kooperation mit der Remmers AG wurde ein vielversprechendes erstes Sequenzierungsexperiment mit bauchemischen Produkten durchgeführt, in dem enthaltene Bakterien identifiziert werden konnten. Allerdings zeigten sich bei der Anwendung der Technik einige z. T. literaturbekannte Limitationen und Probleme, die einen effektiven Einsatz der Nanopore-Sequenzierung in der gegenwärtigen Form für die geplanten Anwendungen verhindern.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel ist es, ein effektives, universelles und preiswertes Verfahren für Mikrobiomanalysen zu entwickeln, das sowohl für weitere geplante Untersuchungen medizinischer Proben als auch für die mikrobiologische Charakterisierung industriell gefertigter Produkte oder Umweltproben angewendet werden kann. Dabei sollten die folgenden Aspekte besonders berücksichtigt werden:

Verlässlicher Nachweis von Bifidobakterien

Ein großes Problem für die geplante Anwendung der Sequenzierung auf Proben Neugeborener stellt die geringe Empfindlichkeit des kommerziell verfügbaren 16S-Systems für Bifidobakterien dar, die auch von anderen Arbeitsgruppen beschrieben wurde. Bifidobakterien müssen unbedingt verlässlich nachgewiesen werden, weil sie Teil einer gesunden Darmflora von mit Milch ernährten Kindern sind; ihre Anwesenheit ist ein erster Hinweis auf eine unkritische Entwicklung. Wahrscheinlich sind für diese fehlende Empfindlichkeit die vom Hersteller Oxford Nanopore Technologies (ONT) angebotenen 16S-Nachweisreagenzien („16 S Barcoding Kit“) verantwortlich. Die Sequenz eines in dem benötigten Kit enthaltenen Primers („27F“) passt nicht gut genug zur DNA der großen Gruppe der Actinobakterien, zu denen die Bifidobakterien zählen.

Identifizierung von Pilzen

Besonders bei der Charakterisierung industrieller Proben sind neben den Bakterien auch die Pilze relevant, da z. B. die Konzentration an Schimmelpilzen häufig genau bestimmt werden soll. Auch in der Medizin ist aber natürlich der Nachweis pathogener Pilze wie *Candida albicans* von großer Bedeutung. Pilze werden von der gängigen Bestimmung der 16S-rDNA aber nicht erfasst, für sie muss ein analoges Gen wie etwa die 18S-rDNA oder die benachbarte sog. ITS-Region sequenziert werden. Für diese Regionen des pilzlichen Genoms gibt es keine kommerziell verfügbaren Reagenzien, d. h., auch hier müssen alternative Primer experimentell ermittelt werden. Anschließend muss überprüft werden, welcher Bereich (18S oder ITS) besser geeignet ist. Die Regionen unterscheiden sich in ihrer Länge und in der Konservierung über die Pilzgruppen hinweg. Für beide Alternativen muss auch die Verwendbarkeit der entsprechenden DNA-Sequenzen in den öffentlichen Datenbanken überprüft werden, um schließlich das System zu ermitteln, das breit einsetzbar ist und verlässliche Daten liefert.

Bioinformatische Auswertung

Die bioinformatische Auswertung der sehr umfangreichen Sequenzdaten mit den vom Hersteller angebotenen Werkzeugen gestaltet sich schwierig. Zum einen müssen die Sequenzdaten (mehrere Gigabyte pro Experiment) per Internet transferiert werden, was langsam und fehleranfällig ist, zum anderen sind die Analysetools wie WIMP („What's In My Pot“) nicht optimal. Der Fokus liegt hier auf Geschwindigkeit, nicht auf Präzision, der Einfluss des Experimentators ist sehr eingeschränkt, und die Darstellung der Ergebnisse kann nicht an die Fragestellung angepasst werden. In der aktiven Community der Nanopore-Benutzer sind wohl auch wegen der beschränkten von ONT verfügbaren Funktionen verschiedene, kostenlose Softwaretools verfügbar, aus denen ein projektspezifischer „Workflow“ vor Ort aufgebaut werden kann. Im Projekt sollen so die erhaltenen Daten lokal und genau kontrolliert ausgewertet und die Ergebnisse vielfältig visualisiert werden können.

Absolute Quantifizierung durch Kombination mit qPCR

Die relativen Daten zur Zusammensetzung des Mikrobioms, die bei Sequenzierungsverfahren erhalten werden, können zu falschen Interpretationen führen. Beispielsweise kann eine starke Zunahme bei einer Art fälschlicherweise Abnahmen bei anderen Arten vortäuschen, obwohl deren Zellzahlen gleichbleiben. Um dieses Problem

zu lösen, wird in der Literatur als „Goldstandard“ die zusätzliche Durchführung von qPCR-Reaktionen empfohlen, da diese eine absolute Angabe der vorhandenen DNA und damit der Zellzahl erlauben (Jian et al. 2020). Hier können die qPCR-Reaktionen aus dem abgeschlossenen Projekt verwendet werden, es müssen allerdings die am besten geeigneten Primerpaare aus der vorhandenen Auswahl identifiziert und die rechnerische Auswertung optimiert werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Verlässlicher Nachweis von Bifidobakterien

Die Auswahl von universellen Primern ist für eine Sequenzierung der 16S-rDNA essenziell. Verschiedene Primerpaare wurden speziell für die bereits durch qPCR analysierten Taxa ausgewählt. Außerdem wurde darauf geachtet, dass eine Long-read-Sequenzierung über ONT erfolgen kann. Um geeignete Primer für das 96 Barcoding Kit von ONT auszuwählen, das anstelle des 16 S Barcoding Kit verwendet werden sollte, wurden die Sequenzen verschiedener Primer (vgl. Tabelle) *in silico* mit der Silva-Datenbank (Datensatz SSU Ref NR 138.1) verglichen. Hierbei wurde besonders auf die Bifidobakterien geachtet. In diesem Test wurde eine Fehlpaarung von einer Base erlaubt.

Primerpaar	Abdeckung aller 16S-Sequenzen in der Datenbank	Abdeckung der <i>Bifidobacterium</i> -16S- Sequenzen in der Datenbank
S-D-Bact-0008-c-S-20 / S-D-Bact-1391-a-A-17	87,60%	89,20%
S-D-Bact-0019-a-S-20 / S*-Univ-1390-b-A-17	85,70%	90,80%
27F / 1492R (16S- Barcoding Kit)	51,50%	2,80%

Tab. 1: Grad der Abdeckung aller bakteriellen Sequenzen bzw. der Sequenzen der Gattung *Bifidobacterium* durch verschiedene Primerpaare (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die von ONT verwendeten „universellen“ 16S-rDNA-Primer decken nur einen deutlich kleineren Teil der bakteriellen Sequenzen ab und sind insbesondere nicht für den Nachweis der Gattung *Bifidobacterium* geeignet (nur 2,8 % der Sequenzen werden gebunden). Aus diesen Werten ist ersichtlich, dass die neuen Primersequenzen im Allgemeinen eine präzisere Amplifikation von Bakterien ermöglichen und damit ein realistisches Gesamtbild des Mikrobioms inklusive der Bifidobakterien liefern können.

Um dies in der Praxis zu überprüfen, wurde ein kommerziell erhältlicher Zell-Standard (ZymoBIOMICS® Gut Microbiome Standard) mit den neuen Primerpaaren sequenziert und die Ergebnisse mit der Bioinformatik-Pipeline (s. u.) ausgewertet.

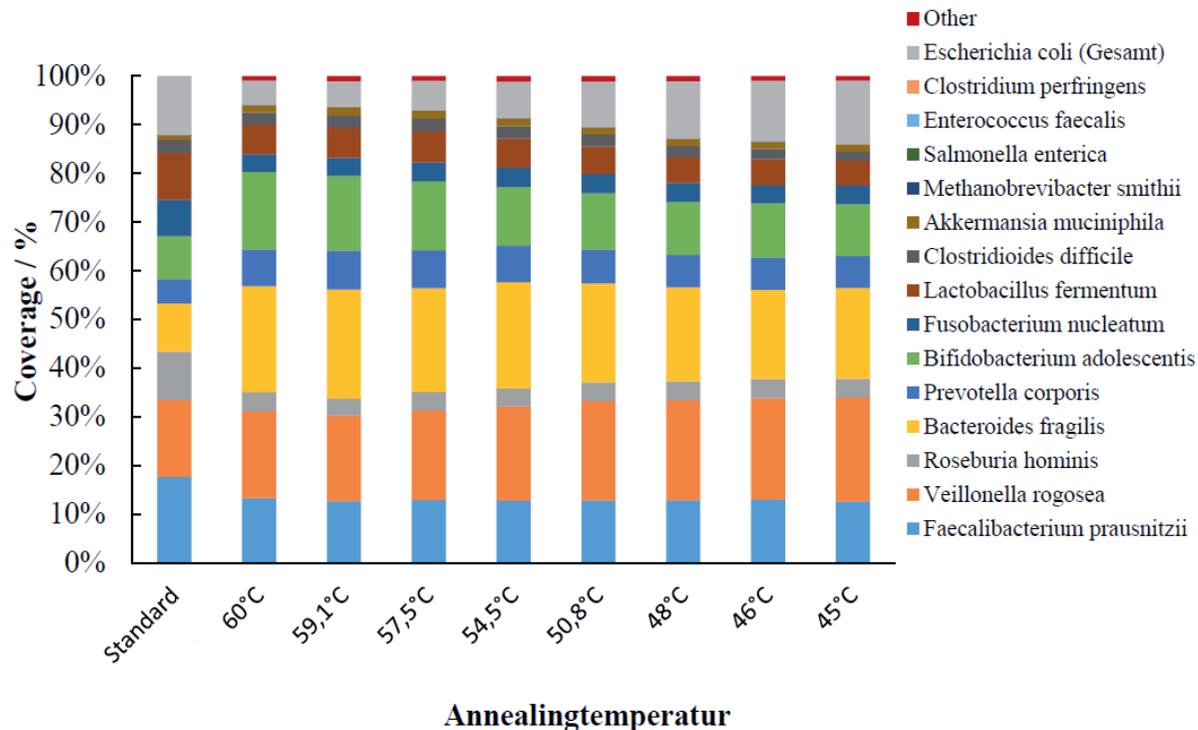


Abb. 1: Sequenzierungsergebnisse des Zell-Standards mit dem Primerpaar S-D-Bact-0008-c-S-20 und S-D-Bact-1391-a-A-17 bei unterschiedlichen Annealingtemperaturen. „Standard“: Zusammensetzung des Standards nach Herstellerangaben (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die Ergebnisse für den Standard zeigten prinzipiell bei beiden Primerpaaren und allen Temperaturen eine gute Übereinstimmung der gefundenen Arten mit der Zusammensetzung des Standards. Hierbei ist zu beachten, dass relative Abweichungen von bis zu 15 % schon zwischen einzelnen Chargen des Standards auftreten und deswegen entsprechende Fehler auch bei der Analyse nicht zu vermeiden sind. Die optimale Temperatur wurde aus der Summe der gesamten Abweichungen, d. h. von jeder Spezies für jede Temperatur, bestimmt. Dabei wurde unter Verwendung der Primer S-D-Bact-0008-c-S-20 und S-D-Bact-1391-a-A-17 die geringste Gesamtabweichung bei einer Annealingtemperatur von 48 °C ermittelt (Abb.1). Außerdem wurden die Bifidobakterien sehr gut nachgewiesen, da hier die zweitgeringste Abweichung aller Analysen vorliegt. Deswegen wird bei zukünftigen Untersuchungen nur noch das Primerpaar S-D-Bact-0008-c-S-20 / S-D-Bact-1391-a-A-17 mit einer Annealingtemperatur von 48 °C in der ersten PCR der Sequenzierung eingesetzt.

Identifizierung von Pilzen

Für die Identifizierung von Fungi werden hauptsächlich die ITS-Region (zwischen 18S- und 28S-Gen), das 28S- oder das 18S-Gen verwendet. Diese haben den Vorteil, dass sie konservierte Regionen (geeignet als Primer-Ansatzstellen) und Regionen hoher Variabilität zur Unterscheidung der Taxa besitzen. Die ITS-Region setzt sich aus den ITS1- und ITS2-Genabschnitten zusammen und wird durch das 5,8S-rRNA-Gen unterbrochen. Der gesamte DNA-Abschnitt besitzt eine Länge von ca. 6 kb. Allerdings kann sich die Länge wegen der Variabilität der ITS-Region verschiedener Spezies um mehrere Hundert Basenpaare unterscheiden.

Zur Sequenzierung wurden zunächst Pilz-spezifische Primerpaare benötigt, welche das Mikrobiom möglichst vollständig abdecken, also die DNA aller Pilze binden können. Dabei wurde v. a. die Region vom 18S-rRNA-Gen bis zum 28S-rRNA-Gen analysiert. Allerdings behandeln die Untersuchungen in der Literatur bisher entweder nicht das Mikrobiom, und somit eine Vielzahl von Pilzarten, oder es werden kurze Amplikons verwendet, welche einen großen Vorteil der Nanopore-Sequenzierung nicht ausnutzen, nämlich die Fähigkeit, lange Fragmente komplett zu sequenzieren. Insgesamt vier Primerpaare, die *in silico* alle wichtigen Pilzgattungen erkennen, wurden identifiziert. Die Bindestellen sind in Abb. 2 grafisch dargestellt.

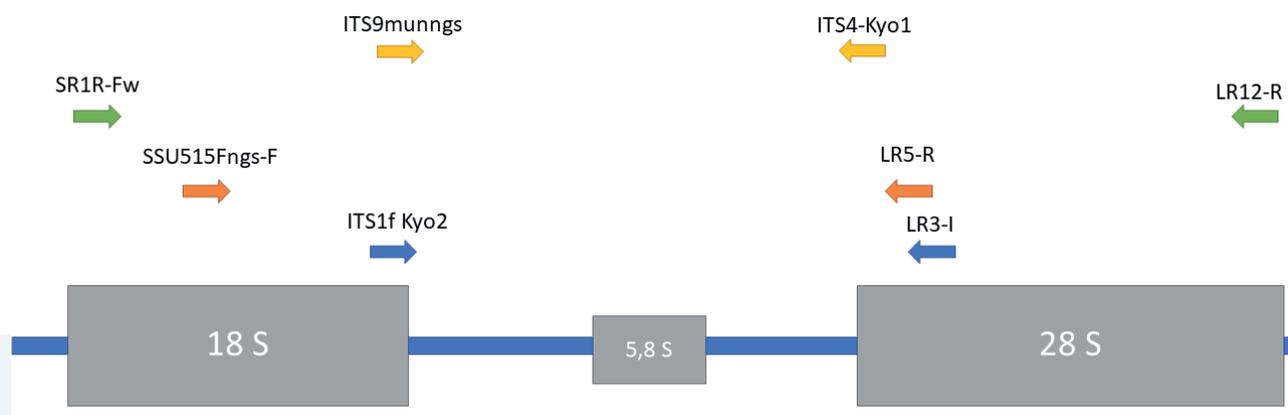


Abb. 2: Ungefähre Positionen der Primerbindestellen im Bereich der Gene der ribosomalen RNA in Pilzen (Primerlängen nicht maßstabgetreu) (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die vier Primerpaare wurden nach Bestimmung der optimalen Annealingtemperaturen zur Sequenzierung mit der Oxford-Nanopore-Technologie verwendet. Da Pilze im Vergleich zu Bakterien nur wenig in kommerziell verfügbaren Standards (auch „Mock Communities“ genannt) enthalten sind, wurde für dieses Projekt eine eigene Mock Community erstellt, um die Sequenzierung und verschiedene Variablen der bioinformatischen Auswertung zu optimieren. Dafür wurden mit den vier Primerpaaren jeweils genomische DNA der Pilze *Saccharomyces cerevisiae*, *Rhodotorula mucilaginosa*, *Candida albicans*, *Aspergillus niger* und *Cryptococcus neoformans* in PCR-Reaktionen vervielfältigt. Anschließend wurden für jedes Primerpaar Lösungen der fünf Pilz-Amplikons nach Bestimmung des jeweiligen DNA-Gehalts vereinigt, um für jedes Primerpaar eine Mischung mit bekannter Zusammensetzung zu erhalten.

Die vier so erzeugten Mock Communities wurden anschließend mit den jeweils passenden Primern sequenziert und die Ergebnisse mit der Bioinformatik-Pipeline (s. u.) ausgewertet. Dabei mussten jeweils Fungi-spezifische Datenbanken verwendet werden, insbesondere die Unite- und Silva-SSU-Datenbanken. Beim Primerpaar ITS9munngs / ITS4-Kyo1 wurde die geringste Abweichung vom theoretischen Anteil der Gattungen festgestellt (Abb. 3).

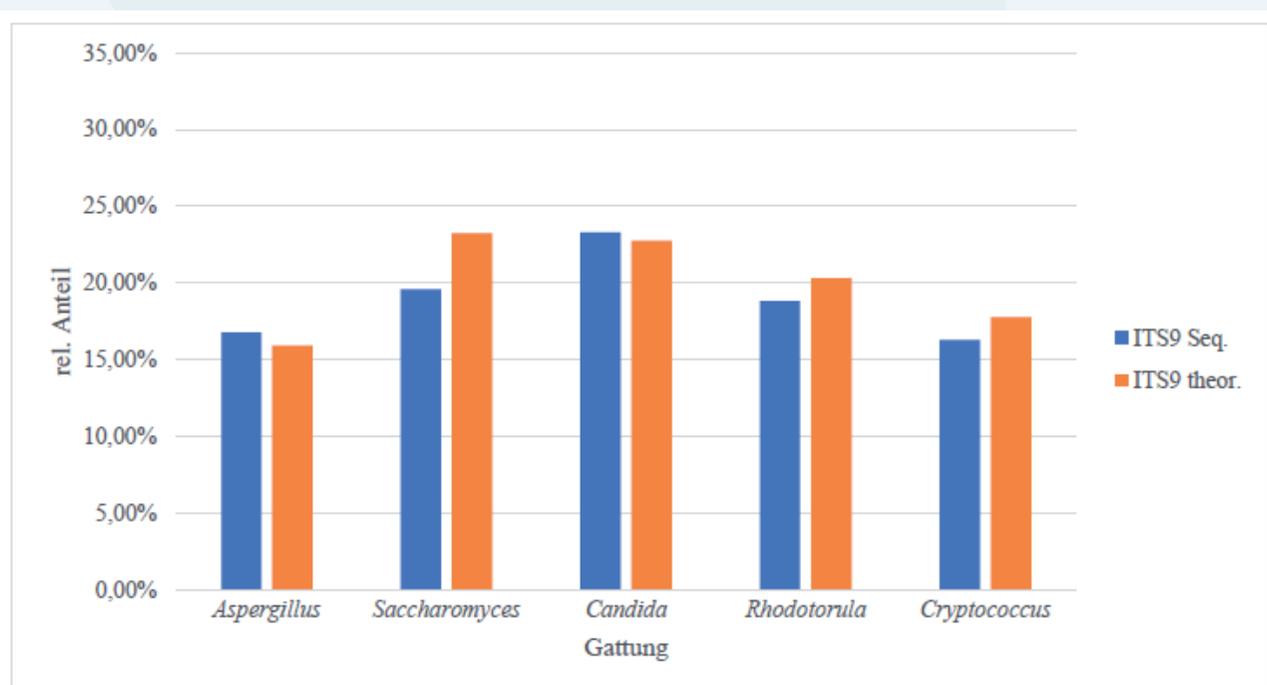


Abb. 3: Vergleich der relativen Häufigkeiten der ITS9munngs-Mock-Community mit der theoretischen Zusammensetzung (DB Unite) (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Das SR1R-Primerpaar ergab zwar bei *Aspergillus* einen deutlichen Unterschied zur theoretisch enthaltenen DNA-Menge (Abb. 4), ist aber dennoch für zukünftige Projekte interessant, weil hier DNA-Fragmente von bis zu 6500 Basenpaaren sequenziert werden. Diese langen Sequenzen sollten eine genaue Zuordnung der Ergebnisse zu einzelnen Arten oder sogar Unterarten erlauben.

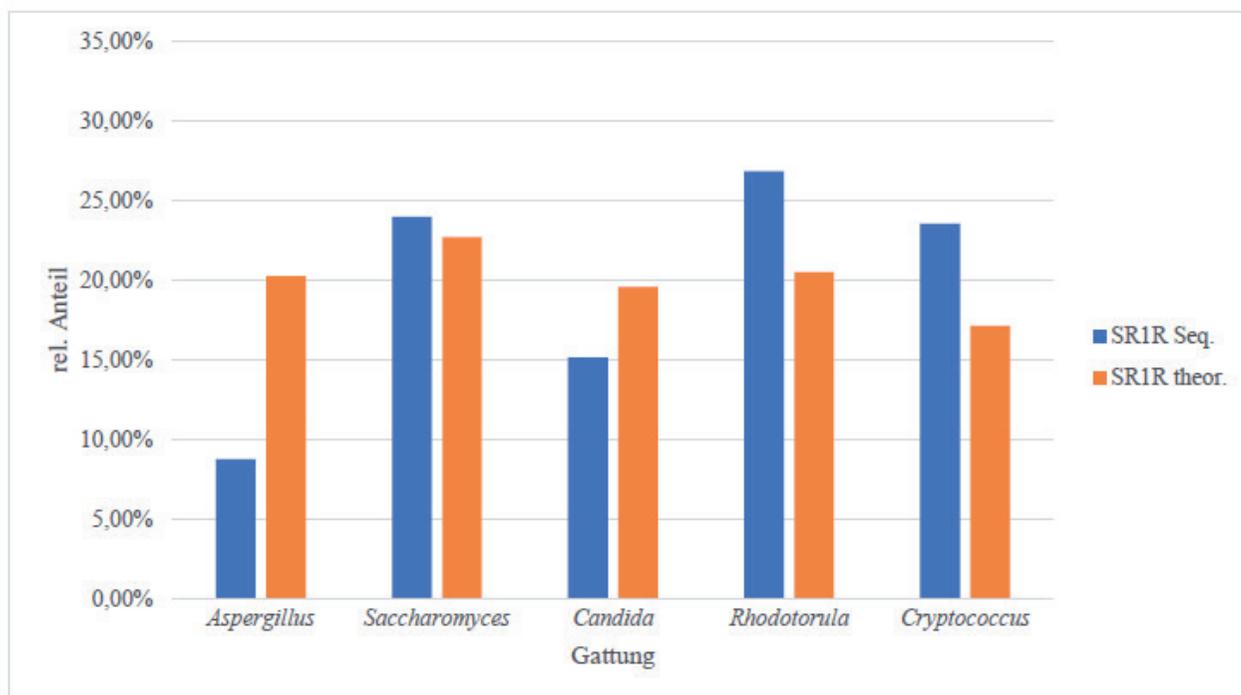


Abb. 4: Vergleich der relativen Häufigkeiten der SR1R-Mock-Community mit der theoretischen Zusammensetzung (DB Silva SSU) (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Bioinformatische Auswertung

Nach dem nasschemischen Prozess der Sequenzierung wurden die Daten bioinformatisch ausgewertet. Dabei wurde eine Meta-Barcoding-Bash-Pipeline für Mikrobiomanalysen unter Verwendung der Oxford-Nanopore-Technologies (ONT) verwendet. Dieses Verfahren wurde speziell für die Analyse von 16S-rDNA-Daten erstellt. Hierbei wird jeder Read, welcher einem 16S-rDNA-Amplikon entspricht, einzeln mit einer benutzerdefinierten Datenbank abgeglichen. Zusätzlich wurde das zugehörige Preprocessing der Pipeline vor dem Sequenzalignment mit Qiime2 über verschiedene Tools realisiert. Entsprechend kann die gesamte bioinformatische Auswertung von den Rohdaten (fast5 Files) über die Qualitätsfilterung bis hin zur taxonomischen Zuweisung der Daten und deren Quantifizierung mit grafischer und tabellarischer Visualisierung automatisch erfolgen. Die Ergebnisse können mittels interaktiver Grafiken dargestellt und ausgewertet werden. Qiime2 View erlaubt die Sichtung der Daten und ermöglicht eine vereinfachte Analyse der Sequenzierungen im alltäglichen Laboreinsatz.

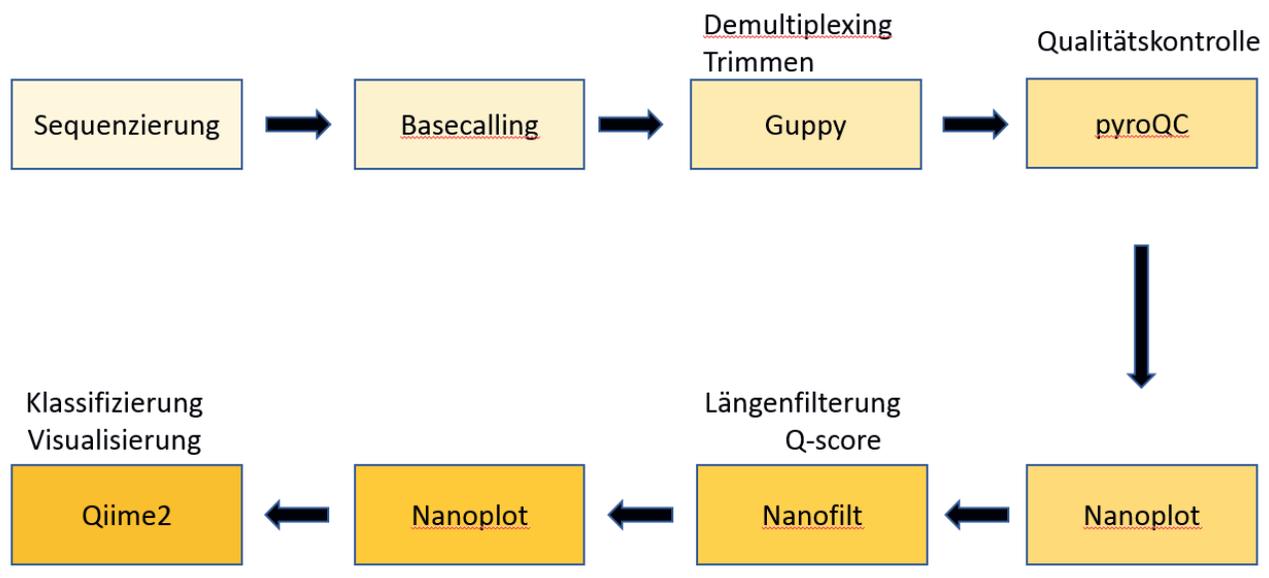


Abb. 5: Schritte der Downstreamanalytik des neu etablierten bioinformatischen Workflows (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die fastq-Dateien der Sequenzierung wurden über Guppy getrimmt und den entsprechenden Barcodes zugeordnet. Darauf erfolgte eine Qualitätskontrolle mit pycoQC auf Grundlage der erstellten Sequencing Summary, welche während der Sequenzierung generiert wird und zu jedem Read den entsprechenden q-score beinhaltet. Mit pycoQC wurden interaktive QC-Plots erstellt. Diese liefern Informationen über die Sequenzierung. Anschließend wurden durch Nanoplot anhand der fastq-Dateien verschiedene Statistiken und Plots etabliert. Entsprechend werden durch Nanofilt diese fastq-Dateien nach q-score (=7) und Länge (1300 bp–1600 bp) sortiert. Folgend lief zum Vergleich wiederum Nanoplot, diesmal auf Basis der gefilterten Dateien. Anhand dessen kann die Filterung schnell kontrolliert werden.

Nun wurden für die eigentliche Auswertung die ausgewählten Barcodes analysiert. Für den Import der fastq-Daten in Qiime2 wurden je Sequenzierung die benötigte Manifest- und Metadata-Datei generiert. Die Daten wurden entsprechend importiert und sog. Feature Tables erstellt. Dieser Schritt ist notwendig, da die aktuell zur Verfügung stehenden Softwarelösungen ursprünglich für das Illumina-System entwickelt wurden und diese bislang nicht speziell auf die ONT angepasst sind.

Jeder Read wird einzeln mit der Datenbank durch den Algorithmus VSearch abgeglichen. Jeder Sequenz wurde dadurch ein taxonomisches Merkmal zugewiesen. Nun wurden Balkendiagramme auf Grundlage der taxonomischen Zuordnung und der relativen Häufigkeit erstellt. Zum Abschluss wurden tsv-Dateien auf jeder taxonomischen Ebene erstellt, sowohl anhand absoluter Werte als auch anhand relativer Häufigkeiten. Diese können in Excel exportiert und bearbeitet werden.

Der hausinterne Workflow wurde mit The ONT high throughput meta-barcoding Pipeline, kurz OHM-Pipeline, betitelt. Der zuvor verfügbare Prozess der Datenverarbeitung (EPI2ME), welcher von ONT bereitgestellt wurde, war für wissenschaftliches Arbeiten nicht ausreichend dokumentiert, nachvollziehbar und instabil. Somit konnte diese Methode nicht für wissenschaftliche Mikrobiomanalysen genutzt werden. Die erarbeitete maßgeschneiderte Lösung hat sich nach einem Vergleich mit den von ONT bereitgestellten EPI2ME-Workflows (genannt „16S“ bzw. „WIMP“) unter Verwendung eines bekannten Mikrobiom-DNA-Standards (ZymoBIOMICS® Microbial Community DNA Standard) als deutlich genauer und zuverlässiger erwiesen. Abb. 5 zeigt, dass die ermittelte Zusammensetzung sehr nahe an der Theorie liegt und bei „16S“ und „WIMP“ deutliche Abweichungen und ein großer Anteil nicht identifizierbarer Sequenzen („other“) auftreten.

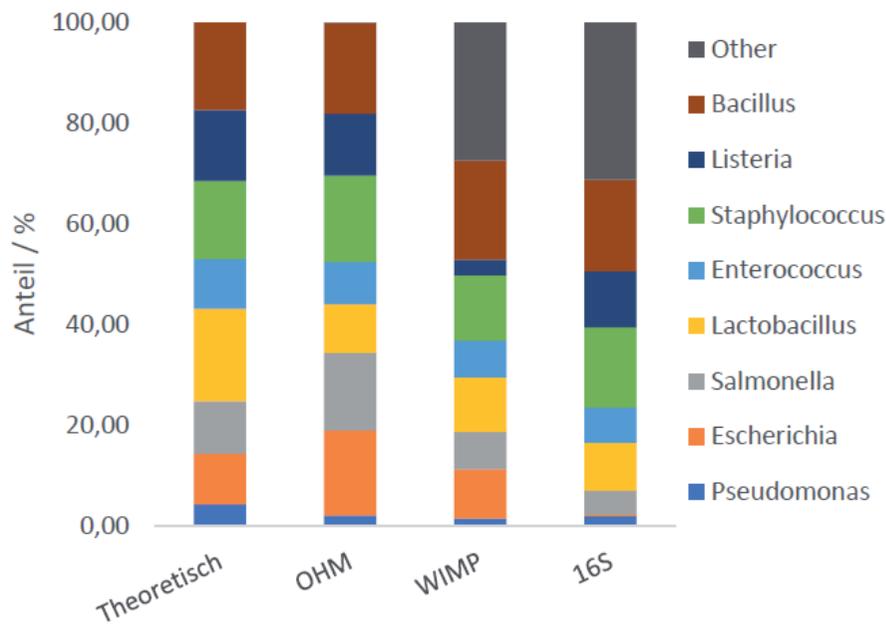


Abb. 6: Auswertung der Sequenzierung des DNA-Standards mit den verschiedenen Bioinformatik-Workflows. „Theoretisch“: Zusammensetzung des Standards nach Herstellerangaben (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Absolute Quantifizierung durch Kombination mit qPCR

In diesem Teilprojekt wurde eine Reihe von Proben sequenziert, welche in den berechneten qPCR-Ergebnissen einen relativen Anteil von mehr als 10 % Bifidobakterium enthielten. Die qPCR ist unabhängig von der Sequenzierung und liefert absolute Zellzahlen.

Die statistische Auswertung der Sequenzierungsergebnisse zu den gleichen Proben erfolgte mit einer Analyse der absoluten Readzahlen. Diese absoluten Reads wurden auf Gattungsebene erhoben, weil die Zuordnung hier sehr verlässlich funktioniert. Die Ergebnisse wurden mit einer Methode berechnet, die eine absolut enthaltene Zellzahl für jedes Taxon bestimmt. Zu Beginn wurden die relativen Häufigkeiten berechnet. Diese ergeben sich aus der Division der absoluten Reads einer Gattung durch die absoluten Gesamt-Reads pro Probe. Dabei sind die „Unassigned Reads“, welche die query coverage von 80 % nicht erreichen, vernachlässigt worden. Um die absoluten Häufigkeiten zu bestimmen, müssen schließlich die relativen Häufigkeiten mit den Ergebnissen der Gesamt-Bakterienzahl multipliziert werden. Diese wurden aus einer unabhängigen qPCR-Bestimmung unter Verwendung universeller Primer (U16SRT-Primer) ermittelt und auf 1g Stuhlprobe hochgerechnet. Zuletzt wurden diese absoluten Häufigkeiten durch die Zahl der genomischen Kopien der 16S-rDNA dividiert, um den Einfluss der unterschiedlichen Kopienzahlen in den verschiedenen Gattungen auszugleichen. Diese Kopienzahlen wurden der rrnDB-Datenbank entnommen.

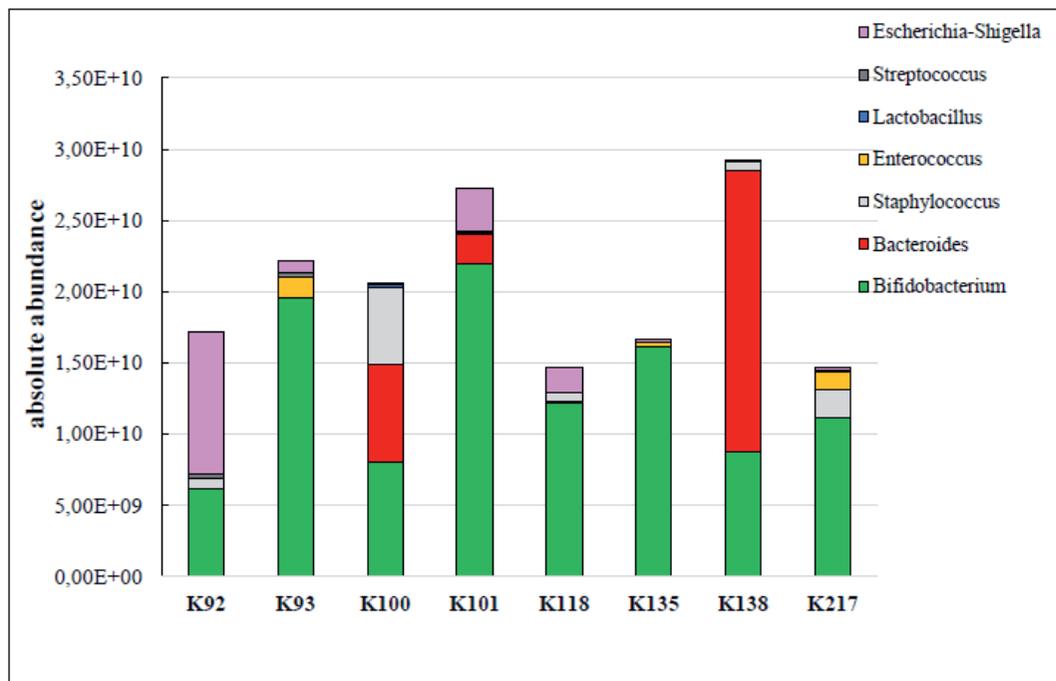


Abb. 7: Absolute Zellzahlen verschiedener Proben auf Gattungsebene (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die Ergebnisse der absoluten Häufigkeiten von 20 sequenzierten Stuhlproben, die Bifidobakterium enthalten, wurden den berechneten absoluten Zellhäufigkeiten aus den spezifischen qPCR-Analysen gegenübergestellt. Die qPCR liefert, wie erwähnt, absolute Zahlen und ermöglicht die Kontrolle der Quantifizierung durch Sequenzierung. Abbildung 7 beschreibt den Zusammenhang und stellt mögliche Abweichungen von bestimmten Gattungen im Vergleich der beiden Methoden dar.

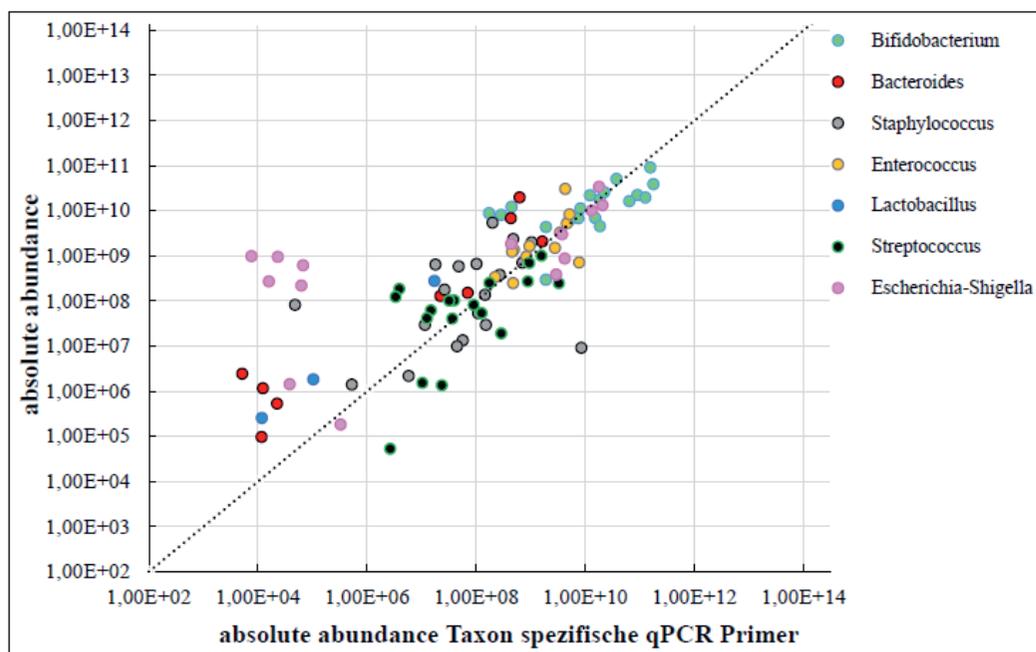


Abb. 8: Auftragung der berechneten absoluten Zellzahlen gegen die absoluten Zellzahlen aus der Taxon-spezifischen qPCR von 20 analysierten Proben (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die Regressionsgerade in Abbildung 7 beschreibt die theoretische, optimale Übereinstimmung von absoluten Zellzahlen der verschiedenen Analysemethoden. Nur bei sehr kleinen Zellzahlen gibt es signifikante Abweichungen, insbesondere bei den Gattungen *Escherichia-Shigella* und *Bacteroides*. Davon abgesehen, stimmen die Daten aus der absoluten Quantifizierung (Kombination von Sequenzierung und universeller qPCR) mit dem „Goldstandard“, der gruppenspezifischen qPCR, gut überein.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die im Projekt erhaltenen Ergebnisse ermöglichen eine effektive Untersuchung verschiedenster Probenmaterialien und erlauben es, praktisch alle enthaltenen Bakterien und Pilze quantitativ, d. h. in absoluten Zellzahlen nachzuweisen. Neu und besonders wichtig sind hier die einfache und nachvollziehbare Auswertung der erhaltenen großen Datenmengen und die verlässliche Bestimmung von Bifidobakterien und Pilzen.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Klinik für Neugeborene, Kinder und Jugendliche des Klinikums Nürnberg (Chefarzt Prof. Dr. C. Fusch) werden die neu etablierten Methoden in einer Studie zur Gabe von Probiotika an Frühgeborene eingesetzt. Dabei soll überprüft werden, wie sich das Mikrobiom bei sehr kleinen Frühgeborenen entwickelt, wenn sie das probiotische Präparat „ProPrems“ verabreicht bekommen. Die Studie ist longitudinal angelegt, d. h., von den Patienten werden möglichst während des ganzen Klinikaufenthalts Proben genommen, um so die Entwicklung des Mikrobioms über einen längeren Zeitraum verfolgen zu können.

Auch ein weiteres Projekt in Zusammenarbeit mit der Remmers AG beginnt bereits. Hier werden Holzlasuren und ihre Bestandteile wie Bindemittel auf ihren Gehalt an Mikroorganismen hin untersucht. Hintergrund sind Verschärfungen bei den Verwendungsvorschriften für Biozide, also allgemein zelltoxische Substanzen. Für die Firma ist es wichtig, einen viel detaillierteren Einblick in die Besiedelung von Rohstoffen und Produkten als früher zu erhalten, um die Herstellungs- und Lagerungsbedingungen zu optimieren.



Biophilic City Design in Urban Planning: Building resilience to pandemics and climate change

Prof. Dr. Birgit Eitel
Fakultät Betriebswirtschaft
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

This project aims to develop broadly applicable best-practice guidance for the incorporation of biophilic design in future-oriented urban planning in temperate and subtropical contexts. The guidance will be informed by case study investigations in Germany and Australia. The guide will include strategic policy options and design examples for city leaders and urban planners to integrate into short, medium- and long-term futures. To better inform selection among choices (e.g. value for investment), the project includes an ecosystem service assessment of a range of biophilic design elements. An ecosystem service assessment of Biophilic Design Elements systematically classifies them against their potential to contribute to ecosystem services. This systematic classification enumerates multiple benefits associated with Biophilic Design Elements.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Betriebswirtschaft
Projektleitung	Prof. Dr. Birgit Eitel
Kontaktdaten	birgit.eitel@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

With the Corona crisis, there is an opportunity to press the reset button on business-as-usual, to re-design our cities as inclusive, safe, resilient and sustainable places under the consideration of climate change aspects. Biophilic design provides an innovative yet practical foundation for facing these challenges. Biophilic Design Elements collectively refers to aggregates of discrete elements designed and operating at building, neighbourhood or city scale. Biophilic Design Elements were conceptualized as natural elements used purposefully as design features within urban landscapes. Biophilic cities are sustainable and resilient cities that provide close and daily contact with nature, but also seek to foster an awareness of and caring for this nature. Achieving the conditions of a biophilic city will go far in helping to foster social and landscape resilience in the face of slow onset impacts of climate change, rapid impacts of natural disasters and associated economic uncertainty from other shocks facing cities in the future. In this context, a resilient city is one that is “capable of withstanding severe shock without either immediate chaos or permanent harm” and involves building adaptive capacity in individuals and in place.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Key question: How can the incorporation of biophilic elements in strategic planning and urban design advance sustainability and increase socio-economic resilience to pandemics and climate change?

Key result: The purposeful incorporation of best-practice biophilic design at the building, neighbourhood, and city/region levels advances sustainability objectives and increases socio-economic resilience to climate-change related stressors and large-scale perturbations from pandemics and extreme events.

Key impact: Cities and neighbourhoods that incorporate biophilic design in planning and infrastructure design create multiple inter-related benefits: reducing greenhouse gas emissions and impacts from climate-related events such as heat island effect; improving health and productivity outcomes, enhancing amenity of private and public spaces; and reducing transmission of pathogens.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

What is a biophilic city, is an open question, and it has several definitions that came up from different researchers. It's a city that always puts the nature first in terms of its design and planning. A biophilic city can also be termed as a biodiverse city where residents can be in close contact with nature and other living beings. The concept of biophilic cities has been drawn from Edward O. Wilson's idea of Biophilia. A Biophilic city cherishes nature already present and constantly participates to restore already damaged nature. Biophilic cities keep what already exists and strenuously make an effort to renovate and fix what is lost. Individuals also have a large responsibility to care about the environment and protect what already exists in the cities.

Many researches have proven the benefits of greener cities in health. As our way of living has changed through years, higher stress levels are being recorded. Stress is considered as a main driver for various diseases and a factor for an unhappy and unproductive life. Nature access can serve as a healer against high stress level. Interestingly, it is proved that individuals underestimate the benefits and enjoyment coming from spending time in nature. Benefits include exhaustion recovery, stress reduction, community social stability, crime, abuse, and conflict reductions, decreased morbidity in multiple disease categories, and improved self-reported health.

During the project several case studies had been conducted. So a special analysis was done for Birmingham, Toronto, Wellington, Amsterdam and Singapore. In the following the results for Singapore are given as an example with the analysis of Singapore:

Biophilic Conditions and Infrastructure

Singapore has a very good biophilic infrastructure, this can be seen starting with the 300 km of Park Connectors and over 350 parks, offering easy access to the city's nature through the possibility of extensive walks. Moreover, does Singapore have a canopy cover of nearly 30 percent, which consists of 844 ha primary forest and 17.9 kha other forests, showing that the city is also keen in preserving primary forests. Singapore has also launched a community garden program called "Community in Bloom" in 2005. Encouraging its citizens to garden in a community in their free time. The initiative has grown to a community of over 40,000 citizens and more than 1,600 community gardens across Singapore.

Biophilic Activities

Singapore is keen on educating its pupils on its nature as well as wildlife, one initiative doing that is the Greening Schools for Biodiversity initiative. The main objective of the program is to encourage students as well as their teachers to be curious, appreciate, support, and learn about the local biodiversity. Building the interest of the students to care for their school grounds and environment in general. Another initiative for schools is the biodiversity week for schools, which consist of up to four different subprograms. Their activities range from planting important trees to pupils conducting their own wildlife survey.

Biophilic Attitudes and Knowledge

Singapore has included different nature watch programmes under the Community in Nature Initiative. These programmes encourage the citizens to spend up to multiple days watching and documenting the different species of the animal in question. The accumulated data is then used to collect valuable current information about the different species of an animal present in Singapore. Those events are not only used to collect data they also animate the citizens to interact with the outdoors and learn more about the nature surrounding them. There are multiple different watches that the citizens can be part of, in total a sum of 5 animal watches from bird watches to butterfly and dragonfly watch. These initiatives are a very good tool in teaching the citizens to recognize the common species of native fauna and flora in Singapore.

Biophilic Institutions and Governance

Singapore has a National Biodiversity Strategy and Action Plan, which was introduced in 2009. This plan aims to introduce an urban biodiversity conservation model achieving urban environmental sustainability, with an attention to the natural heritage available. This is aimed to be done using different principles and guidelines, one of them being the involvement of the citizens and their environmental education and awareness. The second strategy worth mentioning is the Nature Conservation Master Plan, introduced in 2015. This plan aims to consolidate, coordinate, strengthen and intensify the biodiversity conservation efforts of the National Biodiversity Strategy and Action Plan. Moreover, Singapore has biophilic institutions such as, a natural history museum called the Lee Kong Chian Natural History Museum, and botanical gardens. It is an extensive network of gardens, following a four-core concept, which include historic gardens, more educational venues as well as a learning forest. Moreover, the location includes a seed bank as well as different galleries and a heritage museum. Singapore has to offer in its flora and fauna. It is the lead agency for biodiversity and greenery in Singapore, which also shows in all the projects it has already introduced. E.g. NParks runs 3,500 educational programmes yearly, including Community in Bloom and Community in Nature.

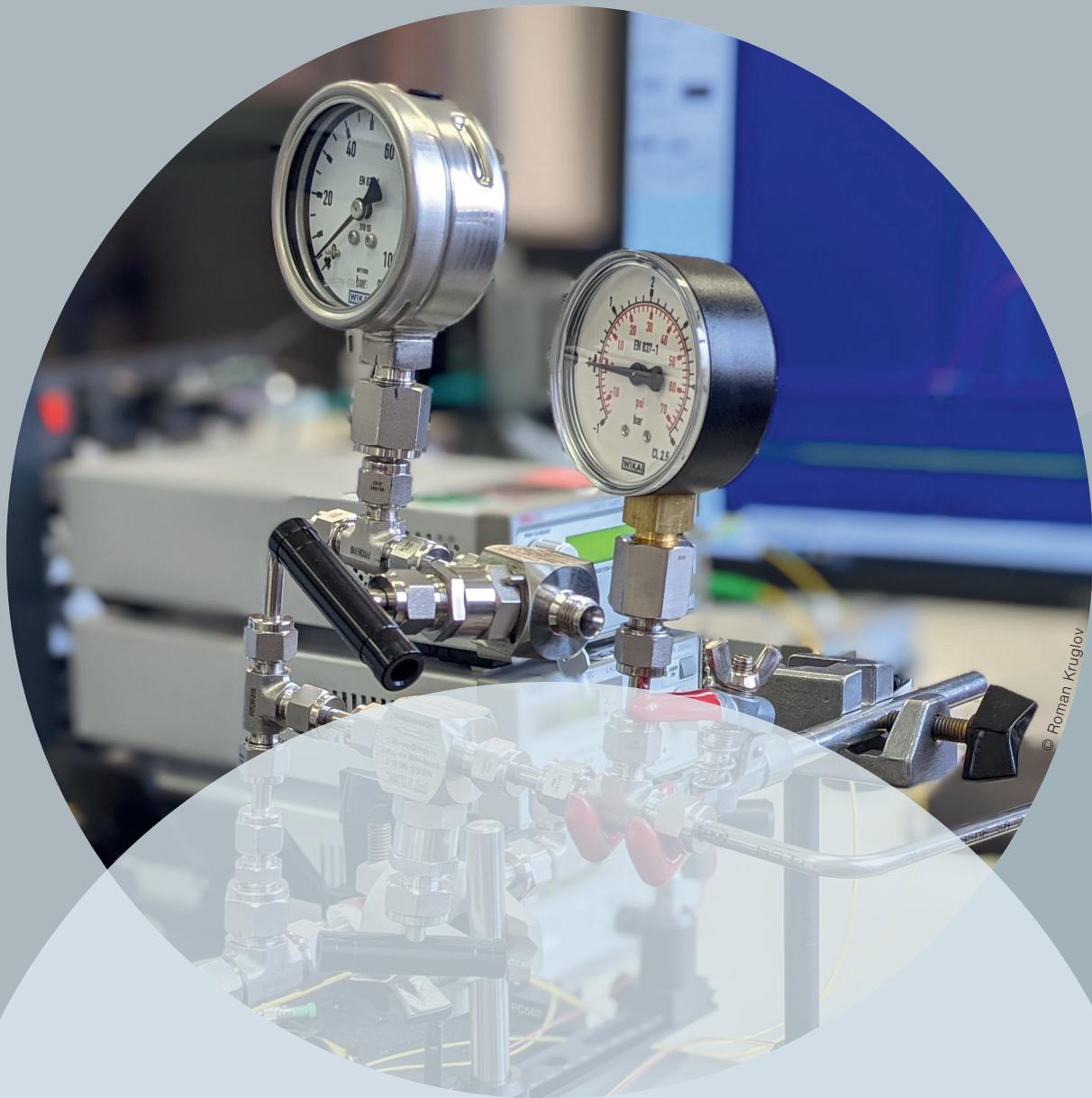


Abb. 1: : Draufsicht auf Gebäude mit Begrünung (Foto: CHUTTERSAP, unsplash)

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Originally, a cooperation was planned with the USC in Australia was planned. Especially, Prof. Dr. Graham Ashford and Prof. Dr. Claudia Baldwin are experts in this field. But because of the COVID-19-crisis the cooperation could not be developed as planned. Therefore, numerous case studies were analysed and were also part in the lectures and bachelor theses. An example is the lecture “Applied Research” in the Masterprogram: Master of international finance and economics.

In future, when it will be possible again, cooperative research proposals will be conducted. Hence, the research will be continued on an international level.



DynoSpec – Hochdynamische spektroskopische Gasanalyse für umweltschonende Verbrennungsprozesse

Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht

Dr. Roman Kruglov

Polymer Optical Fiber Application Center (POF-AC)

Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Zur Erreichung der Klimaziele müssen fossile Verbrennungsprozesse so emissionsarm wie möglich eingesetzt werden. Herkömmliche Verbrennungsmotoren sowie Katalysatoren zur Abgasbehandlung sind bereits hochgradig optimiert. Die Änderung der Kraftstoffzusammensetzung zu H₂ oder e-Fuels ändert jedoch die gesamte Prozesskette der Verbrennung und der Schadstoffbildung. Ziel ist es daher, den Einsatz vergleichsweise günstiger Laserdioden für den Einsatz zur hochdynamischen (d. h. innerhalb weniger Mikrosekunden) spektroskopischen Gasanalyse weiterzuentwickeln. Hierfür soll ein Labordemonstrator mit zwei schnell abstimmbaren Laserdioden aufgebaut werden. Nach Offline-Tests im Labor an kalten Probegaszellen soll ein Konzept für das Grundlagenstudium der Verbrennungsprozesse von e-Fuels und für Sensorik an anwendungsnahen Motorprüfständen entwickelt werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik Institut Polymer Optical Fiber Application Center
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht
Kontaktdaten	rainer.engelbrecht@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Für das Gelingen der Energiewende, zur Erreichung der Klimaziele und zur Luftreinhaltung müssen Verbrennungsprozesse so emissionsarm und ressourcenschonend wie möglich eingesetzt werden. Eine aktuelle Metastudie zur CO₂-Bilanz verschiedener motorischer Antriebskonzepte zeigt dabei zum jetzigen Zeitpunkt keine eindeutigen Vor- und Nachteile einzelner Antriebskonzepte, wenn der gesamte Zyklus von Produktion, Betrieb, Energiebereitstellung und Entsorgung objektiv betrachtet wird. Zumindest für eine Übergangszeit werden Motoren mit Kraftstoffverbrennung benötigt, die dann natürlich effizient und emissionsarm betrieben werden müssen. Verbrennungsmotoren für sehr große Objekte wie Schiffe und schwere Lastkraftwagen können dabei von einer Umstellung (oder Beimischung) des Kraftstoffes von Diesel auf Gas profitieren, um den Wirkungsgrad zu steigern und um Feinstaubemissionen zu reduzieren. Klimaneutral werden Verbrennungsprozesse durch synthetische Brennstoffe, die als chemische Energiespeicher aus erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind erzeugt werden, wie in Bild 1 oben dargestellt. Zunächst wird durch Strom elektrolytisch Wasserstoff erzeugt, der als wichtiger Energieträger der Zukunft untersucht wird. Alternativ werden durch Syntheseprozesse andere chemische Energieträger wie Methan (CH₄), Ammoniak (NH₃), Methanol oder höhere Alkane erzeugt (sog. e-Fuels). Diese können besser transportiert und gespeichert werden als Wasserstoff und sind herkömmlichen fossilen Kraftstoffen ähnlicher. Im Gegensatz zu Letzteren entsteht bei der Verbrennung der synthetischen Kraftstoffe jedoch nur das CO₂, das vorher bei der Synthese aus der Luft entnommen wurde.

Herkömmliche Otto- und Dieselmotoren sowie Katalysatoren zur Abgasbehandlung für fossile Brennstoffe sind bereits hochgradig optimiert. Die Änderung der Kraftstoffzusammensetzung zu H₂, Gas und anderen e-Fuels ändert jedoch die gesamte Prozesskette der Verbrennung und der Schadstoffbildung.

Aus diesem Grund ist sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der Produktentwicklung eine schnelle Analyse der Gasgemische sowohl im Verbrennungsraum als auch im Abgasstrang erforderlich, um die Brennverfahren mit synthetischen Kraftstoffen zu optimieren. Wichtige Analysegas sind dabei Verbrennungsprodukte wie CO_2 , CO , und H_2O , Brennstoffreste wie CH_4 oder Katalysegas wie NH_3 zur NO_x -Reduktion. Herkömmliche Gasanalysatoren liefern jedoch nur Zeitmittelwerte im Abgas und sind für das Verständnis der dynamischen Prozesse im Brennraum sowie für die Auslegung KI-basierter Regelalgorithmen zur Motorsteuerung innerhalb eines Taktzyklus ungeeignet. Daher werden schon jetzt optische Verfahren auf Basis der Laser-Spektroskopie eingesetzt, die eine orts- und zeitaufgelöste Gasanalyse sowohl im Brennraum an präparierten Versuchsmotoren als auch im Abgasstrang bieten. Allerdings sind solche Lasersysteme sehr komplex, sehr groß und äußerst teuer, und sind oft nur Großforschungsprojekten vorbehalten.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel ist daher, den Einsatz vergleichsweise günstiger Laserdioden für den Einsatz zur hochdynamischen (d. h. innerhalb weniger Mikrosekunden) spektroskopischen Gasanalyse weiterzuentwickeln. Diese kleinen Laser dienen primär für die schnelle optische Datenübertragung über Glasfasern und sind dafür kommerziell erhältlich, bieten aber interessante Eigenschaften für die Messtechnik. Bild 1 unten zeigt das Grundprinzip. Über den Betriebsstrom des Lasers kann über der Zeit t die Wellenlänge des Lichtes $\lambda(t)$ verändert werden. Das infrarote Licht wird durch den zu analysierenden Gasraum gestrahlt. Die Analysegas haben charakteristische Wellenlängen, bei denen diese Licht absorbieren (sog. Absorptionslinien, spektraler Fingerabdruck), symbolisch als wellenlängenabhängige Absorption $A(\lambda)$ dargestellt. Durch Detektion der transmittierten Lichtleistung über der Zeit $P(t)$ und damit über der Wellenlänge λ kann auf die einzelnen Gaskonzentrationen geschlossen werden. Eine erweiterte Auswertung der genauen Form des Spektrums erlaubt zusätzlich eine Bestimmung der Gastemperatur und des Drucks, als wichtige Kenngrößen.

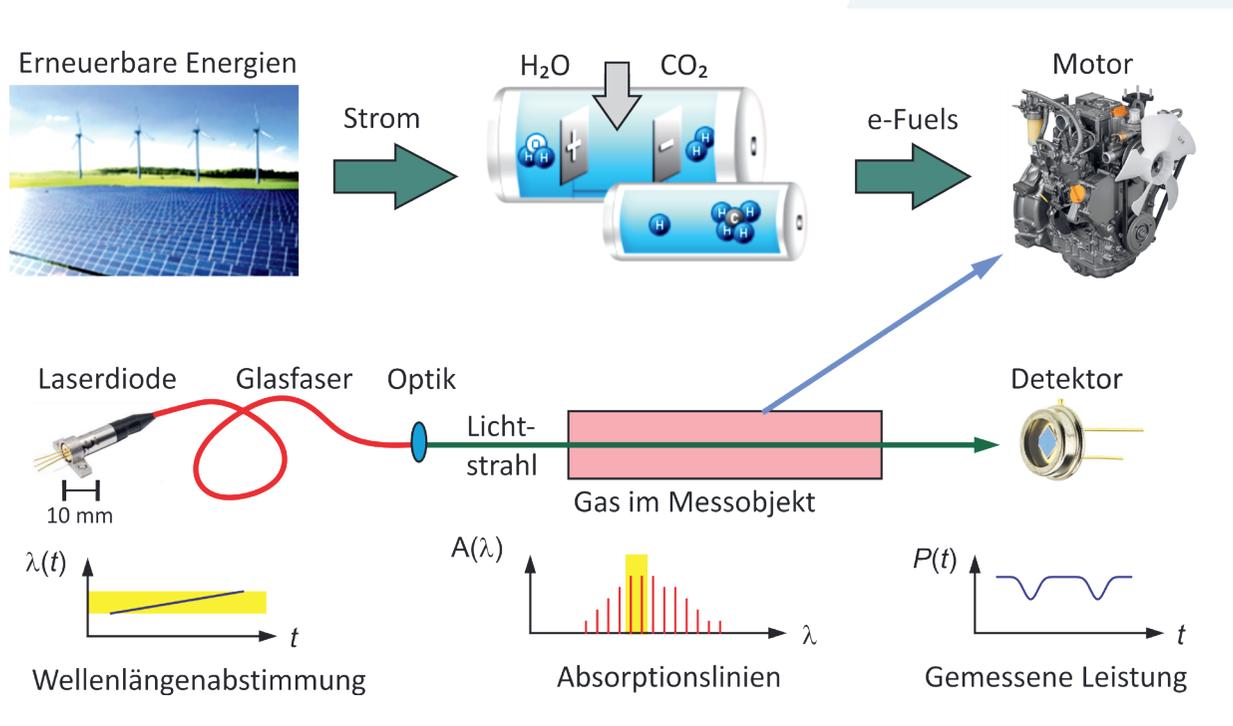


Abb. 1 oben: Synthetische Kraftstoffe (e-Fuels) aus erneuerbaren Energien für Verbrennungsmaschinen.

Abb. 1 unten: Prinzip der spektroskopischen Gasanalyse mit abstimmbaren Laserdioden.

(Bild: Projektbericht DynoSpec, POF-AC, TH Nürnberg)

Diese Technik ist in der Literatur als Tunable Diode Laser Spectroscopy bekannt (TDLAS). Voraussetzung für die angestrebte Gasanalyse von Verbrennungsprozessen ist ein ausreichend großer und schneller Wellenlängenabstimmbereich der verwendeten Laserdioden. Wesentliche Merkmale dieses Projektes sind:

- In Vorarbeiten am POF-AC wurde demonstriert, dass mit geeigneten Strompulsen innerhalb von einer kurzen Zeit von 10 μs eine reproduzierbare Wellenlängenabstimmung im Bereich von 10 nm möglich ist.
- Durch eine geeignete Wahl der Wellenlängen der Laser können durch Einkopplung in die gleiche Glasfaser verschiedene Gassorten gemessen werden.
- Innerhalb des Abstimmereiches von 10 nm befinden sich mehrere Absorptionslinien der Analysegas. Nur damit kann durch Auswertung der Form des gesamten Spektrums eine simultane Bestimmung der Gaskonzentrationen, des Drucks und der Temperatur erfolgen.
- Da eine Einzelmessung nur 10 μs dauert, können bis zu 1000 Messungen pro Sekunde durchgeführt werden. Damit ist ein grundlegendes Studium der Verbrennungsdynamik möglich, und zeitaufgelöste Abgasdaten liefern Grundlagen für schnelle Motorregelungen innerhalb eines Taktzyklus.

Offene Fragen und Herausforderungen sind die sehr geringen Absorptionsstärken der Gase bei nur wenigen cm Weglänge des Lichts im Gasraum (s. Bild 2) in Verbindung mit Störeffekten wie Rauschen der Detektoren, die kurze Messzeit von 10 μs sowie die Reproduzierbarkeit der Wellenlängenabstimmung der Laserdioden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

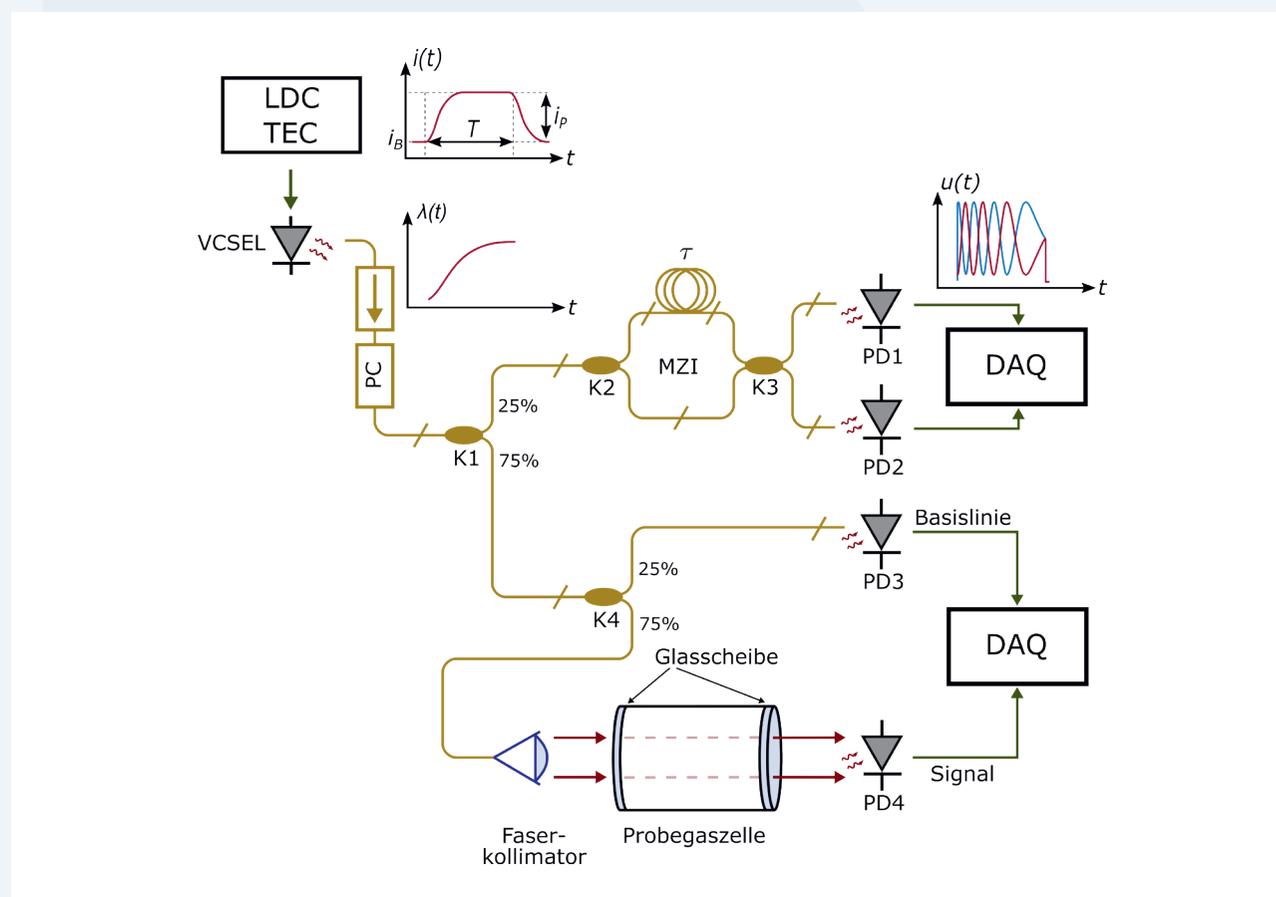


Abb. 2: Messaufbau für die spektroskopische Gasanalyse mit einer abstimmbaren Laserdiode
(Bild: Projektbericht DynoSpec, POF-AC, TH Nürnberg)

Im ersten Schritt wurde ein Messaufbau zur spektroskopischen Gasanalyse entwickelt, der auch das Konzept für den späteren Einsatz an Verbrennungsmaschinen darstellt. Als Lichtquelle kommen sogenannte Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Laserdioden (VCSEL) zum Einsatz. Durch Wahl der mittleren Wellenlänge können verschiedene Gassorten untersucht werden: Ammoniak (NH_3) und Cyanwasserstoff (HCN) bei 1544 nm, Kohlendioxid (CO_2) bei 1577 nm oder Methan in Erdgas (CH_4) bei 1655 nm. Die mittlere Wellenlänge wird durch eine Temperaturkontrolle (TEC) präzise eingestellt, während mit einem Laserdiodencontroller (LDC) kurze Strompulse zur dynamischen Wellenlängenabstimmung innerhalb 10 μs in die Laserdiode eingepreßt werden. Durch Führung des Lichtes der VCSEL in Glasfasern sowie Aufteilung in verschiedene Teilaufbauten mithilfe von faseroptischen Kopplern (K1 bis K4) kann ein komplexer optischer Aufbau robust und kompakt realisiert werden. Ein Beispiel ist ein Mach-Zehnder-Interferometer (MZI), an dessen Ausgang eine digitale Datenerfassung (DAQ) die von zwei Fotodetektoren (PD1 und PD2) empfangene Lichtleistung misst. Aus dem periodischen Muster der detektierten Spannung $u(t)$, dem sogenannten Interferogramm, kann Puls für Puls die dynamische Abstimmung der optischen Wellenlänge des Lasers innerhalb der Pulsdauer von 10 μs präzise bestimmt werden (Bild 3), womit ein wesentliches Projektziel erreicht wurde.

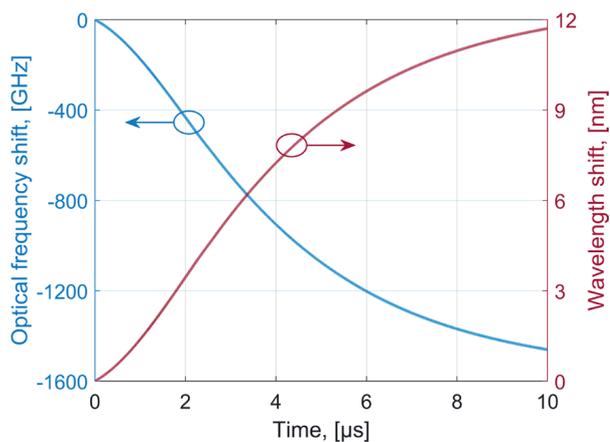


Abb. 3: Dynamische Wellenlängenabstimmung
(Bild: Projektbericht DynoSpec, POF-AC, TH Nürnberg)

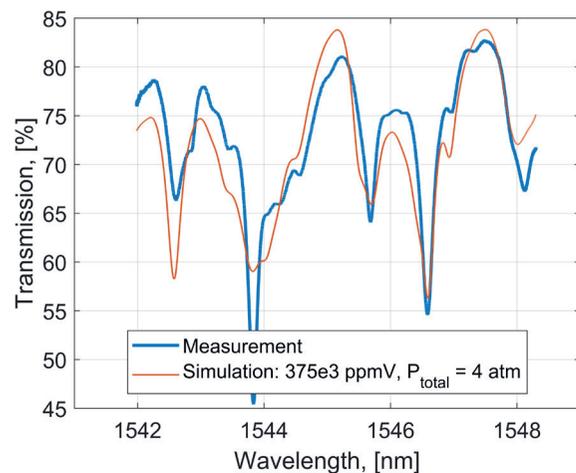


Abb. 4: Gemessene und simulierte Ammoniakspektren

Ein weiterer Teil der Lichtleistung wird auf einen Referenzdetektor (PD3) geführt, der eine Basislinie liefert, da während der Pulsdauer die Lichtleistung nicht konstant ist, und daher gemessen werden muss. Der Hauptteil des Lichtes wird mit einer Glasfaser zum Messort geführt, mit einem Kollimator zu einem Strahl geformt und durch das zu untersuchende Gasvolumen hindurchgestrahlt. Hierfür werden für Labormessungen Edelstahlzellen mit Glasfenstern verwendet, die auch in Gasstränge von Motortestständen integriert werden können. Diese Gaszellen wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), FAU Erlangen-Nürnberg, Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Zigan, aufgebaut. Zusätzlich werden fasergekoppelte Gaszellen mit Referenzgas-mischungen (Cyanwasserstoff, HCN) zu Kalibrierzwecken eingesetzt. Schließlich wird mit Fotodetektor PD4 die durch das Gas transmittierte Lichtleistung als Signal gemessen. Aus einem Vergleich der Signale von PD3 und PD4 kann die für jede einzelne Gassorte charakteristische wellenlängenabhängige Absorption bestimmt werden, während die Auswertung des Interferogramms $u(t)$ des MZI eine präzise Wellenlängeninformation während eines 10 μs langen Lichtpulses liefert. Bild 4 zeigt ein damit gemessenes Spektrum eines Probegases (Ammoniak, NH_3) bei einem Druck von 4 atm, das vom Labor für Verbrennungskraftmaschinen und Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN), Prof. Dr.-Ing. Georgios Bikas, zur Verfügung gestellt wurde. Zur Auswertung wurde zunächst ein Simulationsmodell der Absorptionsspektren in Abhängigkeit der Gaszusammensetzung, des Gasdrucks und der Gastemperatur auf Basis spektraler Datenbanken entwickelt. Mittels eines Least-Square-Fitting-Algorithmus zur Anpassung der Simulation an das gemessene Spektrum kann die Gaskonzentration bestimmt werden (sog. Chemometrie), in diesem Beispiel 37,5 Volumen-Prozent. Damit wurde ein weiteres Projektziel erreicht und der Einsatz der schnell gepulsten VCSEL zur quantitativen Gasanalyse demonstriert. Auffallend in Bild 3 ist neben der

prinzipiellen Übereinstimmung eine im Detail abweichende Form der gemessenen und simulierten Spektren. Insbesondere für Ammoniak ist bekannt, dass die hochkomplexe Struktur des Absorptionsspektrums von spektralen Datenbanken nicht vollständig beschrieben wird. Durch die hochpräzise Messung der dynamischen Wellenlängenabstimmung mithilfe des faseroptischen MZI können unsere Forschungsarbeiten zur Verbesserung dieser wichtigen Datengrundlage beitragen.

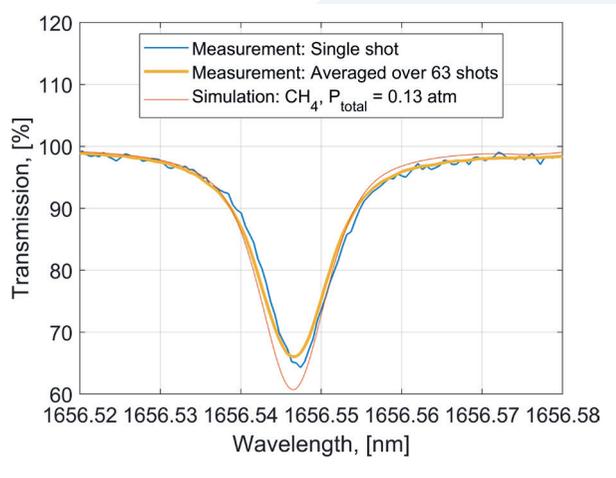


Abb. 5: Methan-Referenzspektrum bei niedrigem Druck
(Bild: Projektbericht DynoSpec, POF-AC, TH Nürnberg)

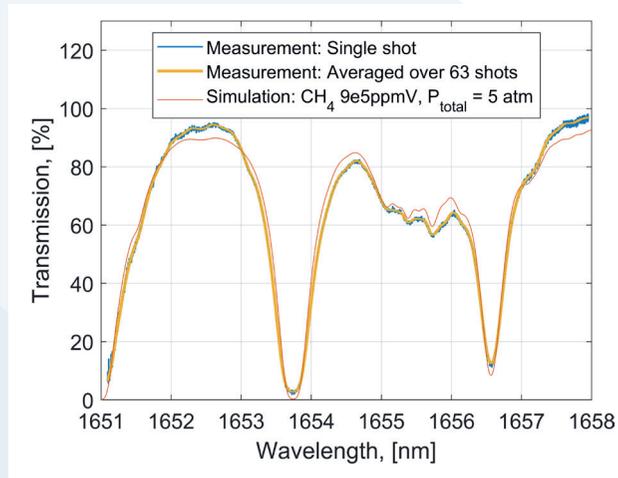


Abb. 6: Messung von CH_4 in Erdgasproben bei 5 atm

Als weiterer Wellenlängenbereich wurde eine VCSEL bei 1655 nm zur Messung von Methan (CH_4) charakterisiert und getestet. Bild 5 zeigt einen Vergleich zwischen Messung und Simulation an einer fasergekoppelten CH_4 -Gaszelle bei niedrigem Druck zum Test der Kalibration der Wellenlängenachse. Zu beachten ist, dass der dargestellte Wellenlängenbereich mit einer Breite von 60 pm nur ein sehr kleiner, vergrößerter Ausschnitt der gesamten Wellenlängenabstimmung ist. Die sehr gute Übereinstimmung der Form beweist die hohe Präzision bei der Bestimmung der dynamischen Wellenlängenabstimmung. Unterschiede in der Transmission sind auf die spektrale Bandbreite der VCSEL als Lichtquelle zurückzuführen und sind Gegenstand weiterer Untersuchungen. Weiterhin enthält Bild 5 einen Vergleich zwischen einer Einzelmessung (single shot) sowie einer Mittelung (Averaging) über 63 aufeinanderfolgende Messungen. Durch die Mittelung können zufällige Schwankungen (Rauschen) reduziert und damit die Konzentrationsbestimmung verbessert werden. Jedoch zeigt auch die Einzelmessung in einer bemerkenswert kurzen Messzeit von 10 μs ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis. Wie in weiteren Experimenten gezeigt wurde, können solche Einzelpulse mit einer Rate von 1000 Messungen pro Sekunde (1 kHz Wiederholrate) erfolgen, womit der Ansatz der hochdynamischen Gasanalyse verifiziert ist.

Stellvertretend für zahlreiche weitere gemessene Spektren zeigt Bild 6 abschließend eine Messung an einer Erdgasprobe, die ebenfalls vom Labor für Verbrennungskraftmaschinen bereitgestellt wurde. Aus der chemometrischen Auswertung wurden ein Gasdruck von 5 atm sowie eine Methan-Konzentration von 90 Volumen-Prozent bestimmt.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Für die Messung von Gaskonzentrationen und Drücken in einem weiten Parameterbereich gibt es eine Vielzahl an Standardmessgeräten. Diese benötigen häufig eine Probenentnahme, oder sind zu langsam, um dynamische Vorgänge z. B. innerhalb eines Zyklus eines Verbrennungsmotors zu erfassen. Das in diesem Projekt aufgebaute Spektrometerkonzept bietet die Möglichkeit, die Messung in-situ, d. h. ohne Gaszugang oder Probenentnahme durchzuführen, sowie Einzelmessungen innerhalb von 10 μs mit einer Wiederholrate bis zu 1000 Messungen pro Sekunde durchzuführen. Ein besonderes Merkmal des entwickelten Sensorkonzeptes ist die Möglichkeit, durch Integration einer Referenzgaszelle sowie eines faseroptischen Mach-Zehnder-Interferometers die Wellenlängenabstimmung einer preisgünstigen und kompakten VCSEL-Laserdiode Puls für Puls zu protokollieren, als Voraussetzung für eine präzise und langzeitstabile Gasanalyse mittels Absorptionsspektroskopie. Erste Labormessungen bestätigen die hohe Qualität der gemessenen Spektren im Vergleich zu spektralen Referenzdaten. Eine erste Publikation zum Abstimmverhalten der VCSEL erfolgte bereits im Frühjahr 2021 auf der Konferenz „Sensor and Measurement Sciences International“ (SMSI 2021).

Auf Grundlage dieses Vorlaufprojektes können nun Anschlussprojekte definiert werden, um zum einen die Präzision der Bestimmung von Gaskonzentration und Druck, auch bei erhöhten Temperaturen, weiter zu untersuchen und zu optimieren, sowie zum anderen, um das Sensorkonzept zur schnellen Analyse von Gasparametern an technischen Verbrennungsprozessen anzuwenden. Mögliche Projektpartner*innen hierzu sind das Labor für Verbrennungskraftmaschinen und Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN) der TH Nürnberg sowie der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der FAU Erlangen-Nürnberg. Ziel weiterführender Förderprojekte auf dieser Basis sind die Optimierung und Anpassung technischer Verbrennungsvorgänge an synthetische Kraftstoffe, gewonnen aus erneuerbaren Energien (e-Fuels), für nachhaltige Mobilitätskonzepte.

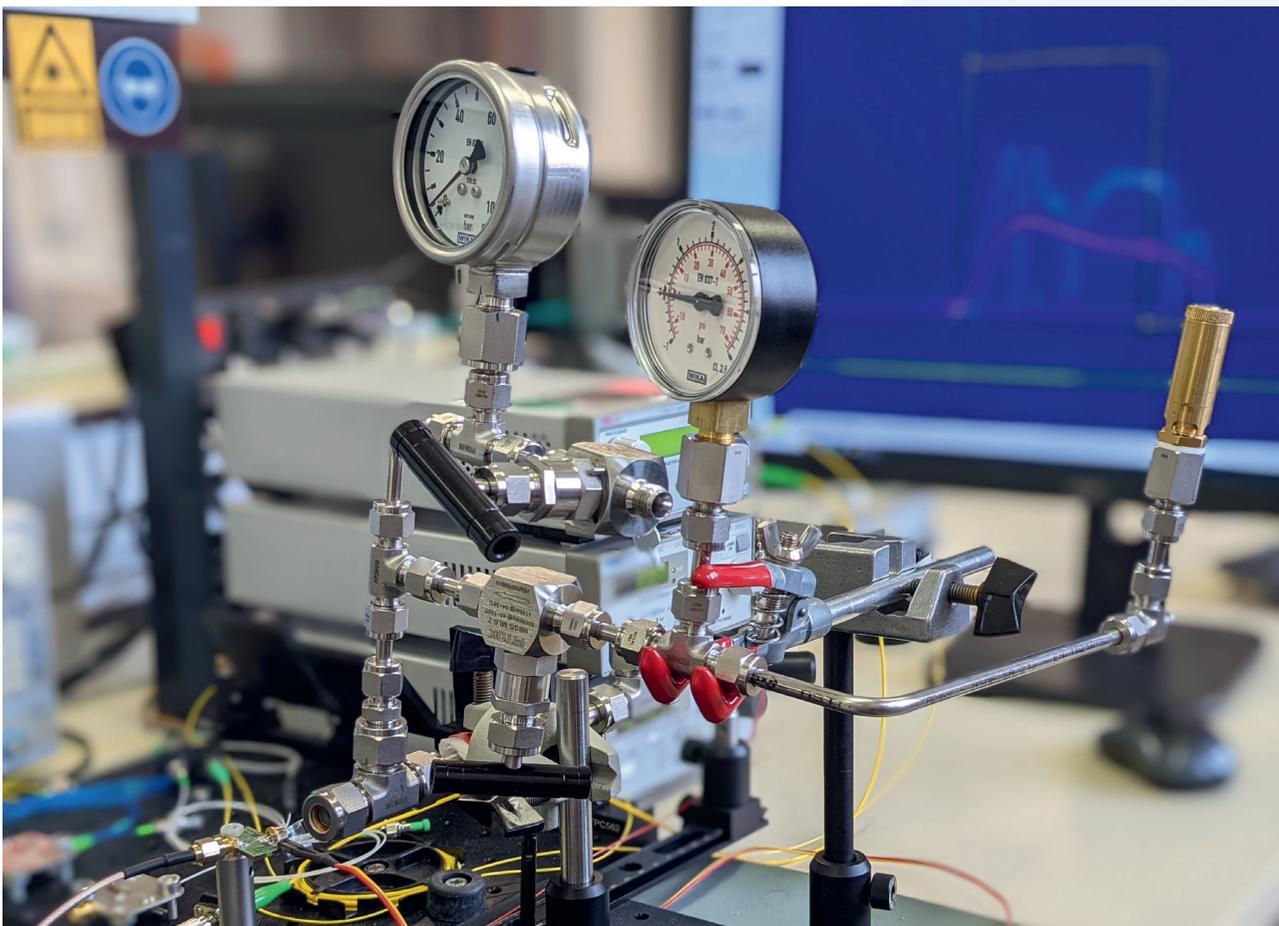


Abb. 7: Gasarmaturen mit optischen Fenstern zur Gasanalyse mittels Laser-Absorptionsspektroskopie (Bild: Roman Kruglov)

Arbeitsmarktwirkungen und der Einsatz von Kurzarbeit in der COVID-19-Pandemie in Deutschland:

Handelt es sich hierbei um eine notwendige
Stabilisierungsmaßnahme oder wird dadurch ein
überfälliger Strukturwandel beeinträchtigt?

Prof. Dr. Hans-Dieter Gerner

Fakultät Betriebswirtschaft

Prof. Dr. Lutz Bellmann

Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (IAB)
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Dr. Marie-Christine Laible

Bundesamt für Migration und Flüchtlinge, Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Im Projekt ging es darum, zu untersuchen, inwieweit die Corona-Krise und damit einhergehend die Corona-Maßnahmen, insbesondere Kurzarbeit und die Ausweitung der Möglichkeit für die Beschäftigten, von zu Hause aus zu arbeiten, einen Einfluss auf die Arbeitsmarktdynamik in Deutschland hatten. Da ein solches Projekt nicht innerhalb eines Jahres abgeschlossen werden kann, bestand unser Hauptziel in erster Linie darin, erste (vorläufige) Ergebnisse zu erarbeiten und Möglichkeiten ausfindig zu machen, in welche Richtung unsere Forschung zu diesem Thema in den nächsten Jahren gehen könnte.

1. Projektdaten

Fördersumme	14.580 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Betriebswirtschaft / Kompetenzzentrum Soziale Innovationen, Methoden und Analysen
Projektleitung	Prof. Dr. Hans-Dieter Gerner
Kontaktdaten	hans-dieter.gerner@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die COVID-19-Pandemie stellte und stellt die Unternehmen vor eine Vielzahl von Problemen. So mussten und müssen die Betriebe nicht nur z. T. ihre Lieferketten überprüfen, sondern auch jederzeit wieder damit rechnen, dass ein erneuter Lockdown die Produktion völlig zum Erliegen bringt. Wenn Unternehmen ihre Produktion bzw. ihr Angebot aufrechterhalten wollen, müssen sie weitgehende Hygienekonzepte erstellen und durchsetzen. Dies können einfache Abstandsregelungen sein oder auch Vereinbarungen mit den Mitarbeiter*innen zum Arbeiten von zu Hause aus (Homeoffice). Der Lockdown im Frühjahr und die Dynamik der Entwicklung, die für die Unternehmen eine immense Unsicherheit darstellen, haben die Wirtschaft in einen dramatischen Zustand versetzt. Die Politik versucht nun mit milliardenschweren Programmen, die negative konjunkturelle Entwicklung abzufedern. Eines der prominentesten Programme ist dabei das Kurzarbeitergeld der Bundesagentur für Arbeit. Darüber hinaus stecken viele Unternehmen auch in einem dramatischen Strukturwandel.

Bereits in der Großen Rezession 2008/2009 wurde das Instrument der Kurzarbeit intensiv genutzt. Inwieweit der Einsatz von Kurzarbeit 2008/2009 tatsächlich Jobs gerettet hat, ist in der Wissenschaft umstritten – die empirischen Ergebnisse hierzu sind nicht eindeutig (siehe u. a. Bellmann/Crimmann/Gerner/Wießner, 2013; Boeri/Brücker, 2011; Möller, 2010). Einigkeit herrscht allerdings dahingehend, dass der Einsatz von Kurzarbeit in der Finanzkrise den Betrieben eine gewisse „Verschnaufpause“ verschafft hat, d. h., die Betriebe hatten die Möglichkeit, sich zu sortieren und ein Bündel geeigneter Maßnahmen zur Beschäftigungsstabilisierung zu schnüren. Während also über die kurzfristigen positiven Effekte von Kurzarbeit für die Betriebe und die Volkswirtschaft in der Forschung Einigkeit besteht, sind die langfristigen Effekte höchst umstritten. Neben der Wirkungslosigkeit bzgl. der Beschäftigungsstabilisierung in der langen Frist, sind auch negative Effekte von Kurzarbeit in Form von Mitnahmeeffekten oder der Beeinträchtigung bzw. Verzögerung eines anstehenden Strukturwandels denkbar.

An dieser Stelle setzten wir mit unserer Vorlaufforschung an. Wir machten erste Untersuchungen dahingehend, inwieweit die COVID-19-Krise und der Einsatz von Kurzarbeit die Dynamik am Arbeitsmarkt und damit den Strukturwandel beeinflussen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Eine wichtige Zielsetzung im Forschungsprojekt bestand im ersten Jahr darin, Ansatzpunkte für weitere Forschungsaktivitäten zu finden. Hierzu haben wir, ausgehend von der existierenden Literatur, Größen für die Messung der Arbeitsmarktdynamik aus betrieblicher Sicht herausgearbeitet und auf der Grundlage der IAB-Befragung „Betriebe in der COVID-19-Krise“ geschätzt. Die Teilziele lassen sich folgendermaßen aufzählen:

- Herausarbeitung der Messung der Arbeitsmarktdynamik aus betrieblicher Sicht
- Schätzung der Maßzahlen auf der Grundlage der IAB-Befragung „Betriebe in der COVID-19-Krise“
- Erörterung möglicher Ansatzpunkte für weitere Forschung

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die COVID-19-Pandemie hat zu dramatischen Verwerfungen in den Betrieben und in der Volkswirtschaft allgemein geführt. Um sich gegen die wirtschaftlichen Folgen zu stemmen, haben die Regierungen milliardenschwere Förderprogramme aufgelegt. Die Betriebe stehen, wie oben bereits geschildert, vor erheblichen Herausforderungen. Sie müssen die ökonomischen Folgen der Krise bewältigen, Abstands- und Hygieneregeln berücksichtigen und gleichzeitig den anstehenden Strukturwandel bewältigen. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht stellen sich hingegen Fragen, wie: Kann sich der Staat die Wirtschaftshilfen leisten? Kommt es durch die Wirtschaftshilfen zu unerwünschten Nebenwirkungen (Behinderung des Strukturwandels) und welche weiteren tief greifenden Änderungen könnten aus der COVID-19-Pandemie resultieren (z. B. dauerhafte Etablierung des Homeoffice)?

Das Hauptaugenmerk unserer Untersuchungen lag in der betrieblichen Perspektive. Es sollte analysiert werden, inwieweit die Corona-Krise und der Einsatz von Kurzarbeit die betriebliche Beschäftigungsdynamik beeinflussen, und damit die Arbeitsmarktdynamik insgesamt, die einen wichtigen Beitrag zu einem gelingenden Strukturwandel liefert. Die Datengrundlage unserer bisherigen Untersuchungen bildet die IAB-Befragung „Betriebe in der COVID-19-Krise“. Hierbei handelt es sich um eine hochfrequente Panelbefragung von etwa 1.500–2.000 Betrieben, die etwa alle drei Wochen seit August 2020 stattfindet. Die Betriebe werden dabei in etwa 15-minütigen Interviews, die vom Meinungsforschungsinstitut Kantar durchgeführt werden, zum Ausmaß von Beschäftigungsanpassungen (hierbei wurden auch Informationen zur Beschäftigungsanpassung seit März 2020 erhoben), Strategien zur Bewältigung der COVID-19-Krise und ihrer allgemeinen Verfassung befragt.

Die Arbeitsmarktdynamik ist für die wirtschaftliche Entwicklung bzw. für den Strukturwandel von enormer Wichtigkeit. Beschäftigte wandern dabei von Betrieben, in die sie weniger gut passen, in Betriebe, in die sie besser passen, oder auch aus Bereichen, die an Bedeutung verlieren, in Bereiche, die an Bedeutung gewinnen (Arbeitskräfteallokation). Will man die Arbeitsmarktdynamik auf betrieblicher Ebene messen, stellt sich also die Frage: Wie passen Betriebe ihre Beschäftigung an? Vor dem Hintergrund unserer speziellen Forschung ist darüber hinaus zu untersuchen: Hat sich das Muster der Beschäftigungsanpassungen in der COVID-19-Krise entscheidend verändert?

Vor der COVID-19-Krise zeigt sich in Bellmann/Gerner/Upward (2018) und Upward/Bellmann/Gerner (2014) insbesondere, dass die jährlichen Einstellungs- und Entlassungsraten in Deutschland bei etwa 13 % bzw. 10 % liegen (in anderen Ländern wie den USA sind diese Raten deutlich höher). Der Zusammenhang zwischen Beschäftigungsänderungen und Einstellung bzw. Entlassungen ist allerdings dem in den USA sehr ähnlich, d. h., in den deutschen Betrieben geht eine Erhöhung der Anzahl der Beschäftigten mit einer 1:1-Erhöhung der Anzahl der Einstellungen einher und auch Beschäftigungsreduktionen werden in erster Linie über Freisetzungen umgesetzt. Deutsche Betriebe sind damit deutlich flexibler als häufig vermutet.

Interessanterweise haben sich diese grundlegenden Muster in der COVID-19-Krise bisher kaum geändert. Auch nicht in Betrieben, die Kurzarbeit eingesetzt haben. Interessanterweise betrug die Einstellungsrate für alle Betriebe im Durchschnitt bis Dezember 2020 etwa 1,8 % (innerhalb von drei Wochen), die Freisetzungsraten ca. 0,5 %, sodass es im Saldo zu einem Beschäftigungsanstieg von ca. 1,3 % kam. Beschäftigungserhöhungen werden weiterhin durch eine Erhöhung der Einstellungen, Beschäftigungsreduktionen durch eine Erhöhung der Freisetzung realisiert. Folgende Abbildung zeigt ausgewählte Schätzungen für die Zeit bis Dezember 2020:

Es zeigt sich hier, dass sogar Betriebe, die Kurzarbeit einsetzen, im Beobachtungszeitraum hinsichtlich ihrer Anzahl der Beschäftigten wachsen (0,5 %). Schätzungen auf der Grundlage neuerer Daten legen schließlich den Schluss nahe, dass Betriebe, insbesondere in der Zeit des zweiten „harten“ Lockdowns, seltener Neueinstellungen vorgenommen haben. Massive Freisetzen sind allerdings in den meisten Fällen bisher ausgeblieben.

	Einstellungsrate	Freisetzungsraten	Beschäftigungsentwicklung	Anzahl der Beobachtungen
Betrieb setzt Kurzarbeit ein	0,011	0,006	0,005	1681
Betrieb setzt keine Kurzarbeit ein	0,018	0,004	0,014	5541
Betrieb setzt Homeoffice ein	0,018	0,005	0,013	2742
Betrieb setzt kein Homeoffice ein	0,020	0,006	0,014	1920

Abb. 1: Eigene Berechnungen auf der Grundlage der Befragung „Betriebe in der COVID-19-Krise“ bis Welle 6 (d. h. Anfang Dezember 2020). Es wurde eine Gewichtung mit der Anzahl der Beschäftigten (bei Stichprobenziehung) vorgenommen. (Grafik: Hans-Dieter Gerner)

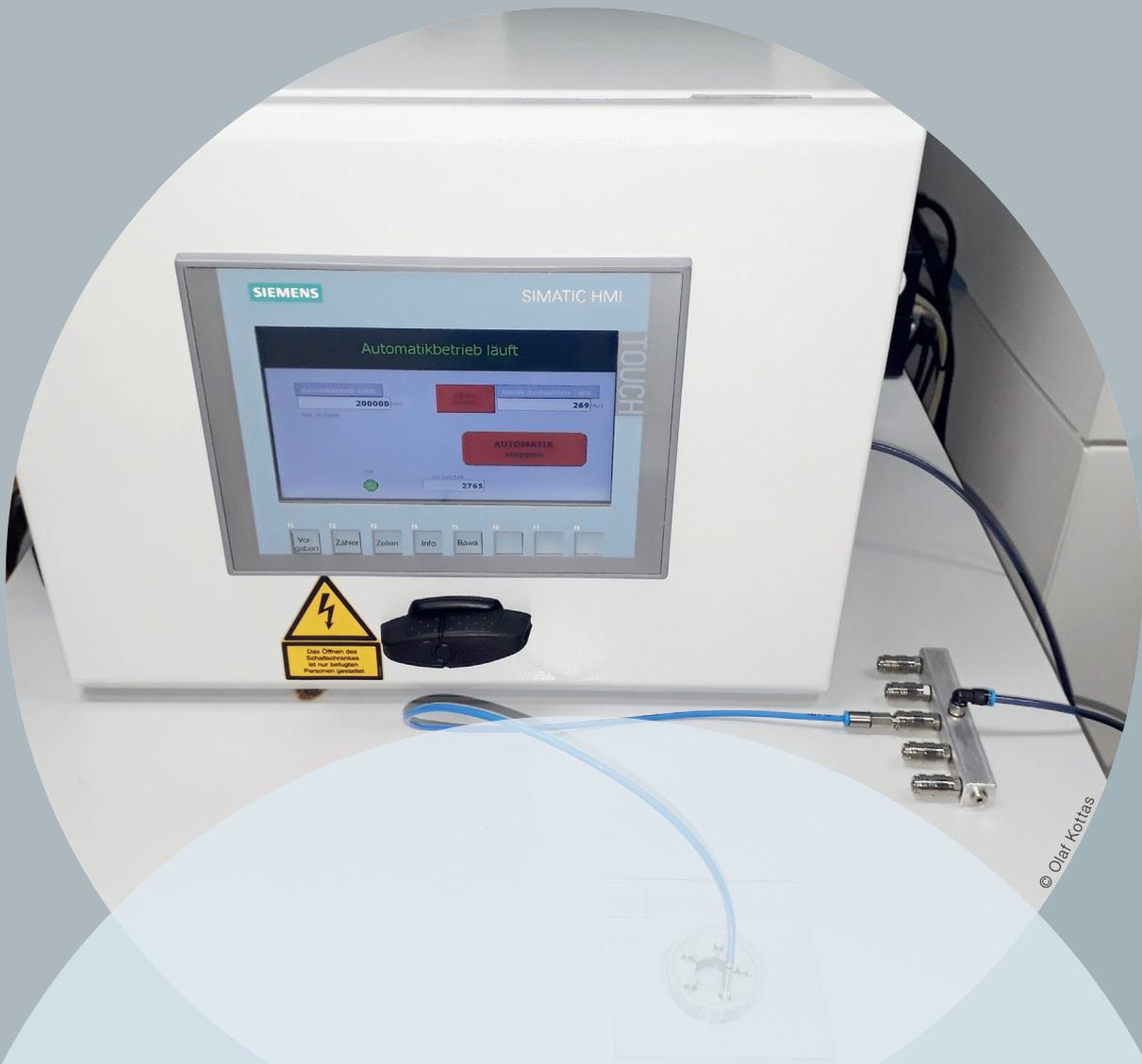
5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Wie oben bereits erläutert, bestand ein wichtiges Ziel dieses ersten Jahres darin, Ansatzpunkte für unsere weitere Forschung zu diesem Thema zu finden. Interessant erscheint uns das Ergebnis, dass Betriebe im Zuge der COVID-19-Krise kaum Beschäftigungsanpassungen vorgenommen haben. Auch die Art und Weise, wie Betriebe ihre Beschäftigung angepasst haben, hat sich qualitativ nicht verändert. Dies steht im Einklang mit Ergebnissen zur Großen Rezession 2008/2009 (Bellmann/Gerner/Upward, 2015).

Eine aktuelle Doktorarbeit von Daniel Ludwig (Ludwig, 2021) weist auf die Relevanz der Betriebskultur im Zusammenhang mit Beschäftigungsanpassungen hin. So reagierten kleine und mittlere Betriebe (KMUs) deutlich zurückhaltender mit Beschäftigungsanpassungen, wenn sie negativen Nachfrageschocks ausgesetzt waren. Dies hat sich zumindest 2008/2009 gezeigt. An dieser Stelle wollen wir in weiteren Forschungen, etwa im Rahmen einer Masterarbeit, die im Frühjahr 2022 startet, ansetzen. Bearbeitet wird diese Masterarbeit von unserer Studentischen Hilfskraft im Projekt „Arbeitsmarktwirkungen und der Einsatz von Kurzarbeit in der COVID-19-Pandemie in Deutschland: Handelt es sich hierbei um eine notwendige Stabilisierungsmaßnahme oder wird dadurch ein überfälliger Strukturwandel beeinträchtigt?“. Für den Fall, dass die Ergebnisse der Masterarbeit vielversprechend sind, planen wir, dass unsere Studentische Hilfskraft ab Herbst 2022 zu diesem Thema im Rahmen einer kooperativen Promotion mit der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ihre Doktorarbeit schreiben kann. Hieraus würden sich dann auch erfahrungsgemäß entsprechende Publikationen ergeben.

6. Literatur:

- [1] Askenazy, Philippe (Hrsg.); Bellmann, Lutz (Hrsg.); Bryson, Alex (Hrsg.); Moreno Galbis, Eva (Hrsg.) (2016): Productivity puzzles across Europe. (Studies of policy reform), Oxford.
- [2] Bellmann, Lutz; Crimmann, Andreas; Gerner, Hans-Dieter; Wießner, Frank (2015): Work sharing as an alternative to layoffs: lessons from the German experience during the crisis. In: Ghosheh, N.; Messenger, J. C. (Hrsg.): Work sharing during the Great Recession. New developments and beyond, 24–71, Genf.
- [3] Bellmann, Lutz; Gerner, Hans-Dieter; Laible, Marie-Christine (2016): The German labour market puzzle in the Great Recession. In: Askenazy, P.; Bellmann, L.; Bryson, A.; Moreno Galbis, E. (Hrsg.), Productivity puzzles across Europe. Studies of policy reform, 187–235, Oxford.
- [4] Bellmann, L.; Gerner, H.-D.; Upward, R. (2015): The response of German Establishments to the 2008-2009 economic crisis. In: Comendatore, P. (Hrsg.); Kayam, S. (Hrsg.); Kubin, I. (Hrsg.), Complexity and geographical economics. Topics and tools, 165–207, Heidelberg.
- [5] Bellmann, Lutz; Gerner, Hans-Dieter; Upward, Richard (2018): Job and Worker Turnover in German Establishments. In: The Manchester School, 86, 417–445.
- [6] Boeri, T.; Brücker, H. (2011): Short-Time Work benefits revisited: some lessons from the Great Recession. In: Economic Policy, 26, 697–765.
- [7] Ludwig, D. (2021): Familienunternehmen und Personalmaßnahmen in Krisenzeiten. Baden-Baden.
- [8] Möller, J. (2010): The German labour market response in the world recession – demystifying a miracle. In: Zeitschrift für Arbeitsmarktforschung, 42, 325–336.
- [9] Upward, R.; Bellmann, L.; Gerner, H.-D. (2014): Beschäftigungsanpassung in deutschen Betrieben: Flexibler als gedacht? In: Zeitschrift für Arbeitsmarktforschung, 47, 71–81.



© Olaf Kottas

Bioaktives Glas zum Knorpelersatz

Prof. Dr. Markus Hornfeck
Fakultät Werkstofftechnik, Institut OHM-CMP
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

- a) Entwicklung eines angepassten Glases mit gezielt eingestelltem Magnesium- und Calciumgehalt zur Verbesserung des Zellwachstums knorpelbildender Zellen auf einem Glasscaffold
- b) Vergleich mit Zusammensetzungen von bestehenden Glasscaffolds
- c) Erhöhung der mechanischen Belastbarkeit der Glasscaffolds durch Polymerbeschichtungen
- d) Entwicklung einer Vorrichtung zur mechanischen Stimulation des Zellwachstums
- e) Idealerweise Test in lebenden Organismen (*In-vivo*-Testung und Nacktmausmodelle)

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Institut OHM-CMP
Projektleitung	Prof. Dr. Markus Hornfeck
Kontaktdaten	markus.hornfeck@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die Technische Hochschule Nürnberg (THN) hat sich in den letzten Jahren zusammen mit der Paracelsus Medizinische Privatuniversität - Abteilung für Anatomie in Nürnberg (PMU) mit der Entwicklung eines neuartigen, bioaktiven Glases (genannt „CAR12N“) zu einem bioaktiven Biomaterial beschäftigt, das zukünftig als Zellträger (Scaffold) dem Gewebeersatz dienen soll. Anwendungsziel ist die Behandlung von Knorpelverletzungen, denn Knorpel verfügt über kein ausreichendes Heilungspotenzial. Ein unbehandelter Knorpelschaden führt dabei noch immer langfristig zu einer Arthrose.

Im Rahmen der Kooperation der PMU und der TH Nürnberg konnte nachgewiesen werden, dass das oben genannte neu entwickelte bioaktive Glas (Patent DE102018114946B3, 2019) in einer geeigneten Form im Hinblick auf Porendimension und Stegdicken als Zellträger für Knorpelzellen (Chondrozyten) hergestellt werden kann. Der Träger konnte erfolgreich mit Chondrozyten besiedelt werden und gewährleistete deren Wachstum und Vermehrung in der Zellkultur. Nach kurzer Zeit konnten die auf dem Träger kultivierten Chondrozyten typische Bestandteile des Knorpels bilden, wie das für die Knorpelfunktion wichtige knorpelspezifische Kollagen vom Typ II. Somit könnte sich dieses Biomaterial besonders zur Knorpelrekonstruktion und damit einer Prävention von Arthrose durch Tissue Engineering eignen.

Zur Vorbereitung des Materials „CAR12N“ für die medizinische Anwendung zur Behandlung von Knorpelschäden ergeben sich folgende Fragestellungen:

- a) Können neben Chondrozyten idealerweise auch menschliche Knochenmarkstammzellen für die Besiedlung des bioaktiven Glases verwendet werden? Untersuchungen diesbezüglich wurden an der PMU durchgeführt und ergaben die Bildung einer knorpelspezifischen Matrix im Scaffold als Zeichen einer Knorpelbildung.
- b) Wie verhält sich das bioaktive Glas im Vergleich zu anderen bioaktiven Gläsern unter gleichen Versuchsbedingungen im Zellkulturlabor bei Verwendung von Chondrozyten?
- c) Wie wirkt sich die im Rahmen des Staedtler-Projektes entwickelte Polymerverstärkung innerhalb des bioaktiven Trägers auf die Zellen aus?

- d) Wie können weitere Verbesserungen zur *In-vitro*-Gewebebildung erzielt werden? Hier würden sich auf Basis des Standes der Technik bei anderen Biomaterialien besonders mechanische Stimulationsverfahren eignen.
- e) Wie kann das bioaktive Glas weiter im Hinblick auf die medizinische Anwendung qualifiziert werden? Dies bedingt *In-vivo*-Testungen, d. h. erste Erprobungen im Tierexperiment und damit im lebenden Organismus.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Zur Beantwortung der obengenannten Fragen zum „CAR12N“ wurden folgende Ziele mit Projektbeginn festgelegt:

- a) Optimierung der Glaszusammensetzung des bioaktiven Glases „CAR12N“ und Untersuchung der Auswirkung auf menschliche Knochenmarkstammzellen im Zellkulturlabor der PMU.
- b) Herstellung des in der Literatur beschriebenen bioaktiven Glases „13-93“ in gleicher Scaffold-Topologie wie „CAR12N“ an der Fakultät Werkstofftechnik und idealerweise Untersuchung mit Vergleich zum „CAR12N“ im Zellkulturlabor der PMU bei Verwendung von Chondrozyten.
- c) Entwicklung einer Mechanostimulationsvorrichtung, die auf die Bedingungen im Zellkulturlabor und dem verwendeten bioaktiven Glasscaffold angepasst ist.
- d) Beantragung von *In-vivo*-Testungen und idealerweise Durchführung der Versuche im Nacktmausmodell.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Glasentwicklungen zum „CAR12N“ und Herstellung des in der Literatur beschriebenen „13-93“

Das bioaktive Glas „CAR12N“ hat eine Zusammensetzung von 62,7 % SiO_2 , 25,6 % Na_2O , 7 % P_2O_5 , 2,0 % B_2O_3 sowie 1,0 % K_2O . Diese Zusammensetzung wurde dahingehend modifiziert, dass zum einen SiO_2 einmal gegen 2 % MgO („CAR12N-MgO“) und zum anderen SiO_2 gegen 1 % MgO und 1 % CaO ersetzt wurde („CAR12N-MgO/CaO“).

Das in der Literatur beschriebene bioaktive Glas „13-93“ hat eine Zusammensetzung von 53 % SiO_2 , 20 % CaO, 12 % K_2O , 6 % Na_2O , 5 % MgO und 4 % P_2O_5 .

Die Herstellung der Gläser und der für die Zellkultur benötigten Scaffolds gliederte sich gleich in die Prozesse „Gemengeherstellung“, „Schmelzen“, „Mahlen“, „Beschichten“ und „Sintern“. Die Qualität der entstehenden Scaffolds wird dabei über Formfaktoren, insbesondere Glattheit der Stege definiert. Die Abbildung 1 zeigt hierzu ein Beispiel eines nicht ausreichend lang oder nicht bei ausreichend hoher Temperatur gesinterten Scaffolds (a, b), was an der rauen Oberfläche der Stege zu erkennen ist und eines gut gesinterten Scaffolds (c, d).

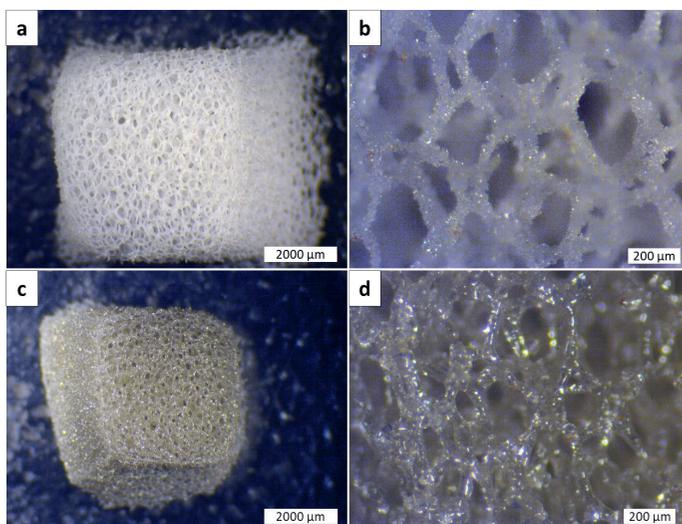


Abb. 1: Abbildung eines nicht ausreichend gut gesinterten Scaffolds „13-93“ (a, b) und eines gut gesinterten Scaffolds „13-93“ (c, d). (Grafik: Silvana Müller)

Die Sinterparameter wurden für das „13-93“ aus der Literatur entnommen und für das „CAR12N“ standen diese grundsätzlich zur Verfügung. In beiden Fällen waren Adaptionen der Sinter Temperatur und Sinterzeit vorhersehbar, da ein komplett neuer Sinterofen verwendet wurde. Diese Adaptionen der Sinter Temperatur und Sinterzeit wurden mit „CAR12N“ durchgeführt, führten aber allein nicht zu einer ausreichend hohen Ausbeute an qualitativ guten Scaffolds, sodass umfangreiche Einbauten im Sinterofen notwendig waren.

Bei der Anpassung des Sinterprogrammes an „13-93“ ergaben sich als weitere Schwierigkeiten, dass entgegen der Literatur nur ein äußerst enges Sinterfenster vorhanden war und überraschenderweise Kristalle an den Stegen vorhanden waren. Diese Problematik der Kristalle und des engen Sinterfensters konnte erst durch eine deutliche Intensivierung der Mischprozedur der Rohstoffe überwunden werden.

Die Sinterversuche zum „CAR12N-MgO“ und zum „CAR12N-MgO/CaO“ liefen aus diesem Grund zeitlich stark nach hinten verschoben erst im August / September an, sodass eine Überprüfung der Zellkulturuntersuchungen nicht im Projektzeitraum durchgeführt werden konnte, sondern auf 2022 verschoben wurde.

Die ersten Zellkulturuntersuchungen am „13-93“ im Vergleich zum „CAR12N“ zeigten, dass Chondrozyten am „13-93“ anhaften und sich vermehren, wie es in Abbildung 2 zu sehen ist. Die Ergebnisse sollen in verfeinerten Untersuchungen verifiziert werden.

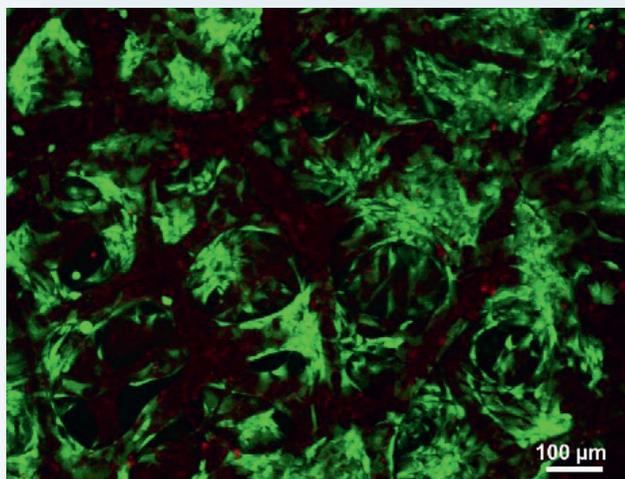


Abb. 2: Besiedlung des bioaktiven Glases „13-93“ mit Chondrozyten. Nach einer siebentägigen Kultivierung werden lebende Zellen in Grün und tote Zellen in Rot dargestellt. (Foto: Clemens Gögele)

Mehrfachbeschichtung des „CAR12N“ mit abbaubarem Polymer

Das Verfahren zur Verstärkung des „CAR12N“ mittels abbaubaren Polymers ist in einem angemeldeten Patent (DE102019124879A1) beschrieben. Es handelt sich hierbei prinzipiell um einen Beschichtungsvorgang des Scaffolds mit einer Lösung des Polymers, wobei die Beschichtung mehrfach durchgeführt werden kann. Eine einfach durchgeführte Beschichtung zeigte keine Reduktion des Zellwachstums in der damaligen Patentanmeldung. Jedoch war eine detaillierte Untersuchung der Wirkung des Polymers auf die Zellen und damit auch in Bezug zur Anzahl an Beschichtungsvorgängen von Interesse. Abbildung 3 zeigt ein Bild eines Scaffolds mit infiltriertem Polymer.

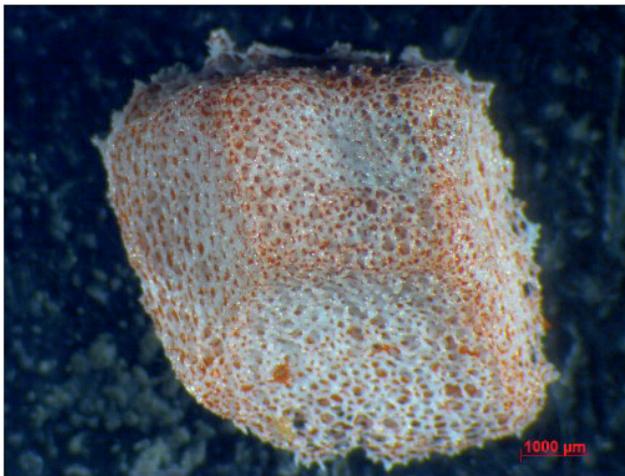


Abb. 3: Scaffold nach einmaliger Infiltration mit rot eingefärbtem Polymer
(Foto: Andreas Pradel)

Die Untersuchungen zur Wirkung des Polymers in Bezug zur Anzahl an Beschichtungsvorgängen bezogen sich auf die Porosität des Scaffolds (diese beeinflusst die Zellaktivität), die mechanische Stabilität und die Wirkung auf Zellwachstum und -adhärenz. Die Ergebnisse werden im Jahr 2022 zur Publikation eingereicht. Das Manuskript konnte in der Projektlaufzeit verfasst werden. Grundsätzlich kann an dieser Stelle gesagt werden, dass die gering ausgeprägte Wirkung einer Mehrfachbeschichtung auf die mechanischen Eigenschaften einer eher suppressiven Wirkung auf das Wachstum der Chondrozyten gegenübersteht. Eine Mehrfachbeschichtung wird deswegen in Zukunft nicht mehr untersucht.

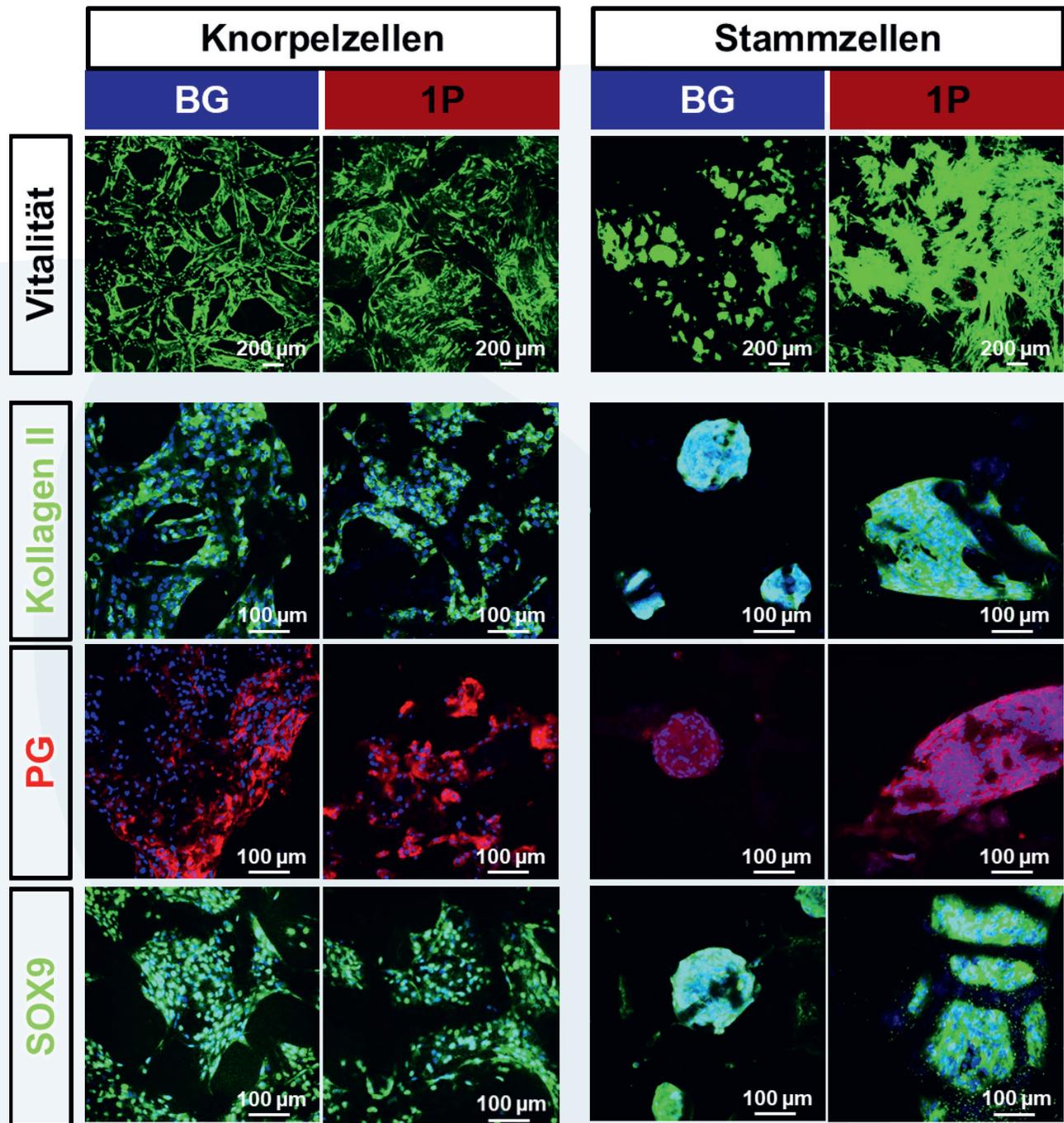


Abb. 4: Untersuchungsergebnisse aus dem Zellkulturlabor am „CAR12N (BG)“ und „CAR12N mit einmal Polymerverstärkung (1P)“. Gezeigt werden lebende (grün) und tote (rot) Knorpel- und Stammzellen nach 21 Tagen auf den jeweiligen Scaffolds. Mittels immunzytochemischer Färbung konnten auf Proteinebene die Expression von Kollagen Typ II (grün), knorpelassoziierten Proteoglykanen (PG, rot) und der Transkriptionsfaktor SOX9 (grün) nachgewiesen werden. Die Zellkerne werden in Blau dargestellt. (Grafik: Clemens Gögele)

Entwicklung einer Mechanostimulationsvorrichtung

Aus der Literatur ist die mögliche, zellstimulatorische Wirkung von mechanischen Schwingungen auf die *In-vitro*-Gewebebildung bekannt. Gelenkknorpel unterliegen im Körper einer stetigen zyklischen Be- und Entlastung. Weiterhin erfolgt die Versorgung der Zellen im Scaffold nach erster Gewebebildung überwiegend durch Diffusion. Eine mechanische, zyklische, aber nicht zwingend schnelle und starke Be- und Entlastung könnte nicht nur die Matrixsynthese der Zellen, eine gewünschte Vernetzung der Komponenten der extrazellulären Knorpelmatrix bewirken, sondern auch die Versorgung der Chondrozyten im Scaffold positiv beeinflussen.

Auf Basis dieser Überlegung wurde ein Minimodell eines Belastungsgerätes unter Nutzung von Magneten erstellt, aber aufgrund der Kopplung der möglicherweise ebenfalls stimulatorischen Effekte des elektromagnetischen Feldes schlussendlich nicht weiterverfolgt.

Stattdessen wurden zur Belastung der Scaffolds (mind. 3 Stück pro Versuchsreihe) pneumatische Zylinder ausgewählt, die mittels eines Steuergerätes gezielt im Sinne einer variabel einstellbaren zyklischen Be- und Entlastung mit reiner Druckluft versorgt werden. Das Steuergerät und der zugehörige Aufbau der pneumatischen Zylinder sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt.

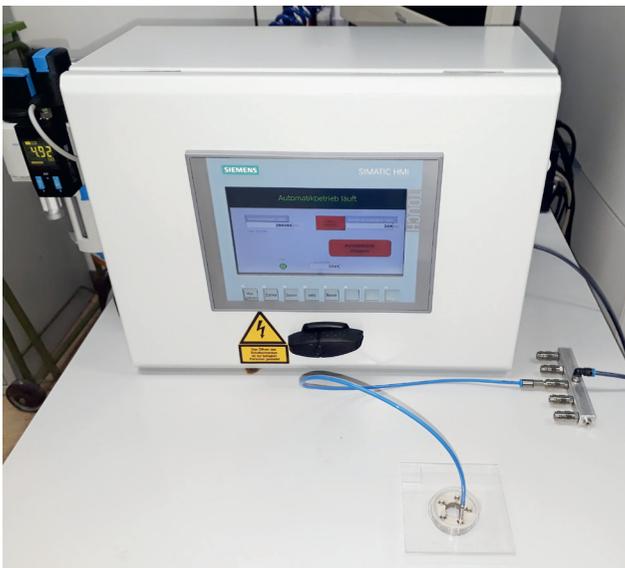


Abb. 5: Steuergerät der Pneumatikluft und Versuchsaufbau zur Mechanostimulationsvorrichtung mit pneumatischen Zylindern (Foto: Olaf Kottas)

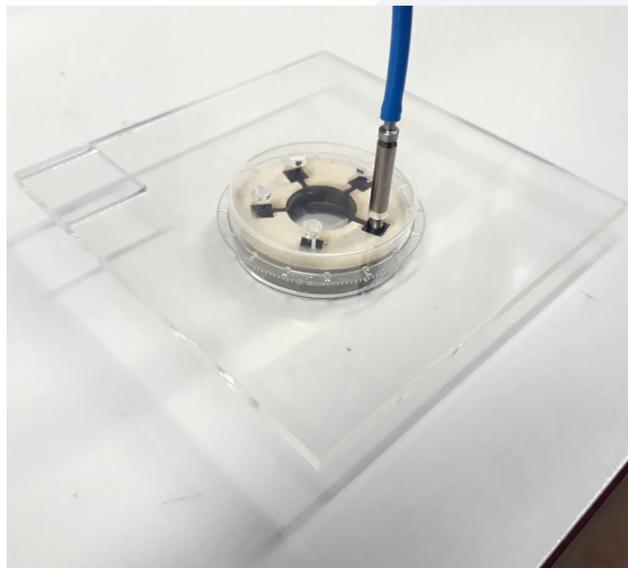


Abb. 6: zeigt exemplarisch einen mittels Druckluftschlauch angeschlossenen Pneumatikzylinder in einer Kunststoffplatte eingespannt, um den darunter befindlichen Scaffold in der Auskerbung gepulst mechanisch belasten zu können. Die Kanäle dienen dazu, dass die Nährlösung im Zentrum ab- und wieder zugeführt werden kann. (Foto: Olaf Kottas)

In-vivo-Testungen

Die an der THD hergestellten Scaffolds von „CAR12N“, „13-93“, „CAR12N-MgO“ und „CAR12N-MgO/CaO“ müssen vor Beginn der Kultivierung im Zellkulturlabor an der PMU sterilisiert werden. Die chemische Sterilisation mittels Salzsäure wurde von der PMU im Rahmen des Kooperationsprojektes in der Vergangenheit angewandt. Für die klinische Praxis wären hingegen die Ethanol- oder Dampfsterilisation (Autoklavierung) geeignete Methoden. Aus diesem Grund wurden zur Vorbereitung der *In-vivo*-Untersuchungen umfangreiche Tests zur Ethanol- und Dampfsterilisation durchgeführt und deren Einfluss auf die Gläser, aber auch später auf die Zellen im Zellkulturlabor bewertet. Es zeigte sich, dass beide Sterilisationsverfahren im unterschiedlichen Maße das Material oder die Zellen beeinflussen und deswegen die chemische Sterilisation weiterhin das Verfahren der Wahl blieb.

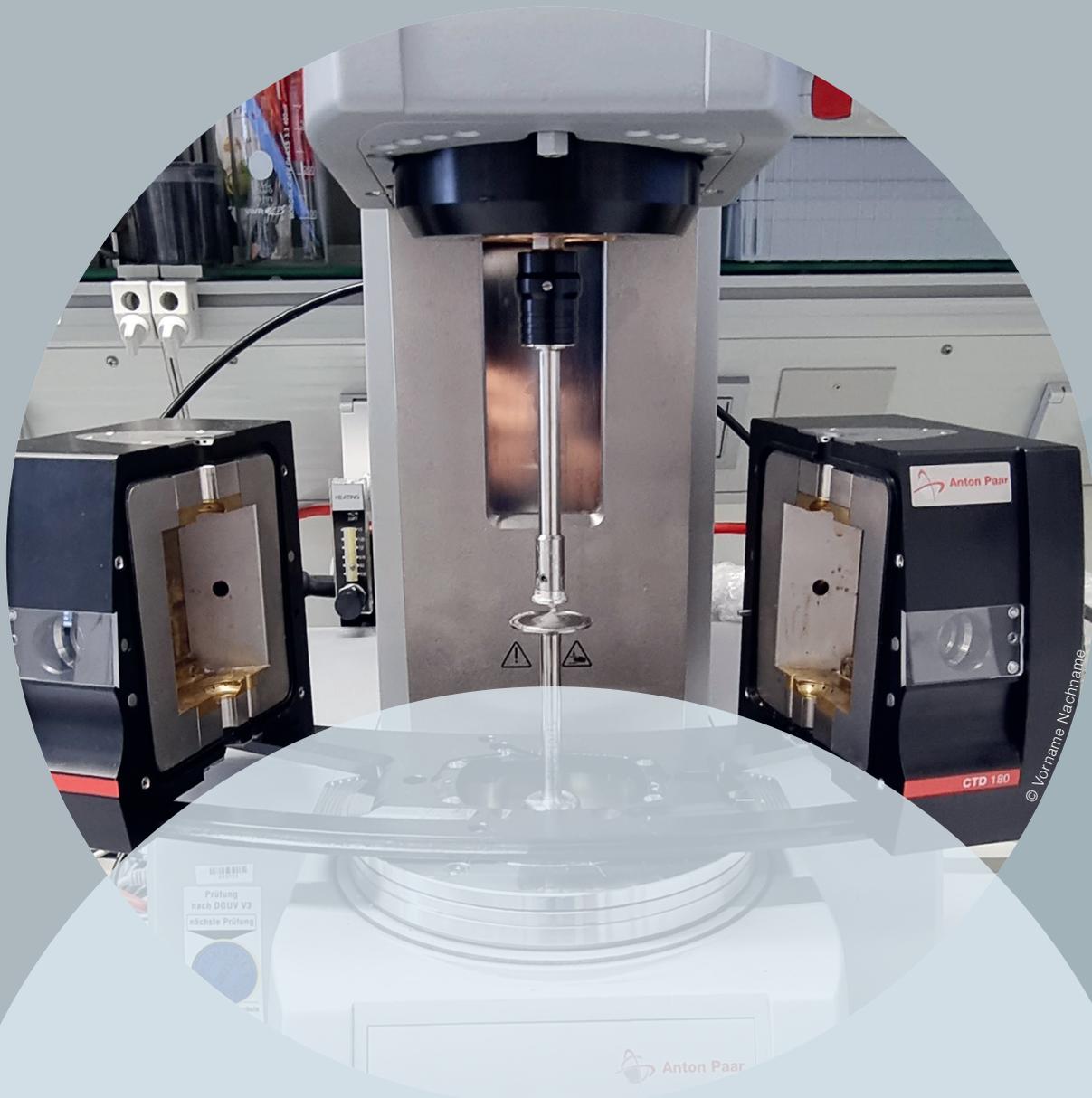
Das Versuchs- und Analysesetting für die geplanten Versuche im Nacktmausmodell wurde genau definiert. Der Tierversuchsantrag wurde von den beiden Tierärztinnen am Institut für Anatomie erstellt und mit dem Tierschutzbeauftragten der Versuchseinrichtung mehrfach detailliert diskutiert und abgestimmt. Am 5. Juli 2021 wurde der Antrag mit der befürwortenden Stellungnahme des Tierschutzbeauftragten durch das interne Reviewboard des Klinikums Nürnberg genehmigt. Er wurde nun bei der zuständigen Behörde (Regierung von Unterfranken) eingereicht. Es folgten entsprechend den Kommissionssitzungen der Behörde drei Stellungnahmen mit Änderungsvorgaben und entsprechende Überarbeitungen des Versuchsantrages erfolgten. Im Januar 2022 wurde der Antrag abschließend genehmigt.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Wie bereits im obigen Text erwähnt, werden weitere wissenschaftliche Arbeiten und Projekte folgen. Das Projekt ist durch außerordentlich hohe Nachhaltigkeit gekennzeichnet, da hier wesentliche Schritte zum o. g. Ziel weiter erarbeitet wurden.

Die Projektpartner*innen haben die Ergebnisse aus dem Projekt dem interessierten Fach- und dem Laienpublikum in verschiedenen Publikationen mitgeteilt:

- a) Die bisherigen Ergebnisse der Arbeitsgruppen sind in einer ersten Publikation zusammengefasst (Gögele et al., 2021-Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2021 Nov;130:112421. doi: 10.1016/j.msec.2021.112421., Anlage 1). Für die oben genannte Publikation wurden in der Förderperiode die Revision und im Peer-Review-Prozess geforderte Ergänzungsexperimente durchgeführt. Die Daten sind open access publiziert und daher einer weiten wissenschaftlichen Community frei zugänglich.
- b) Es wurde ein Manuskript zum Einfluss einer Polymerverstärkung des Bioglasscaffolds auf Knorpelzellen und mesenchymale Stammzellen erstellt, welches in den nächsten Wochen zur Publikation eingereicht werden soll.
- c) C. Gögele, S. Müller, A. Pradel, S. Wiltzsch, A. Lenhart, M. Hornfeck, A. Rübling, H. Kühl, K. Schäfer-Eckart, T. Weiger, G. Schulze-Tanzil: What are the implications of polymer infiltration in a new developed bioactive glass scaffolds (CAR12N) for cartilage tissue engineering? Vortrag auf dem EORS-Kongress, Rom, Italien, September 2021.
- d) S. Wiltzsch, C. Gögele, G. Schulze-Tanzil, A. Lenhart: Entwicklung eines Bioglasses zur Knorpeldefektrekonstruktion. Vortrag auf der 94. Glastechnischen Tagung der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft (Online), Mai 2021.
- e) Für die „Lange Nacht der Wissenschaften“ im Mai 2022 wurde mit dem Institut für Anatomie der PMU Nürnberg ein Filmbeitrag erstellt, in dem das Projekt auch thematisiert wird.
- f) Es erfolgte eine Zeitungsreportage zum Projekt (*Bild der Frau*, 5. November 2021, sowie im *PMU Journal*).
- g) In der Projektgruppe wurden mögliche Verwertungsstrategien diskutiert und es erfolgten Kontaktaufnahmen zu Firmen.
- h) Drei Bachelorarbeiten wurden im Rahmen des Projektes an der Fakultät Werkstofftechnik zum Thema des bioaktiven Glases betreut.



„Klebrigkeit“ von Schmierfetten

Prof. Dr. Karl-Heinz Jacob
Fakultät Angewandte Chemie
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Tribologisch beanspruchte Kontaktflächen lebensdauergeschmierter Gleitlager oder Spindeltriebe laufen mit der Zeit trocken, was zum Ausfall solcher lebensdauergeschmierter Tribosysteme führt. Davon sind besonders solche betroffen, bei denen Schmierfett über weite Wege geschoben wird. Ein damit verbundener Verarmungsprozess verliert an Bedeutung, wenn verdrängtes Schmierfett aufgrund seiner Klebrigkeit im geringeren Umfang verdrängt wird. Da es aktuell weder für Entwickler noch für Anwender von Schmierfetten eine Kennzahl gibt, die über die *Klebrigkeit* von Schmierfetten Auskunft gibt, hat es sich dieses Vorlauforschungsprojekt zum Ziel gesetzt, eine Prüfmethode zur Ermittlung der Schmierfettklebrigkeit zu erarbeiten und eine Kennzahl zu definieren. Die Prüfmethode soll mit Rheometern durchgeführt werden können, weil sie Standardmessgeräte in Laboren von Schmierstoffherstellern und -anwendern sind.

1. Projektdaten

Fördersumme	34.500 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Angewandte Chemie / Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung
Projektleitung	Prof. Dr. Karl-Heinz Jacob
Kontaktdaten	karl-heinz.jacob@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

In der Verkehrs- und in der Automatisierungstechnik kommen Antriebe, Führungen oder Aktuatoren in riesigen Stückzahlen zum Einsatz. Deren Tribosysteme müssen unter unterschiedlichsten Bedingungen über die geforderte Gebrauchsdauer störungsfrei funktionieren und gleichzeitig hohe Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz erfüllen. Um dies zu gewährleisten, werden sie im zunehmenden Maß lebensdauergeschmiert. Lebensdauerschmierungen bieten den Mehrwert kompakter, wartungsfreier und kostengünstiger Konstruktionen, was zur Ressourceneffizienz beiträgt. Gegenüber ölgeschmierten Systemen reduziert sich auch die Leckagegefahr, was aus Umweltschutzgründen zu begrüßen ist. Bei solchen Systemen werden Schmierfette ungerechtfertigterweise kaum als konstruktives Element wahrgenommen, obwohl sie mit darüber entscheiden, wie lange ein störungsfreier Betrieb möglich ist. Dabei gibt es für sie in solchen Systemen zwei wichtige Herausforderungen zu bestehen:

- sie müssen während der Gebrauchsdauer ausreichend Schmiermittel an die Reibstelle abgeben.
- sie dürfen aus der Reibstelle weder vollständig verdrängt, weggeschoben noch abgeschleudert werden.

Für die Beurteilung der Eignung von Schmierfetten in lebensdauergeschmierten Wälzlagern gibt es bereits etablierte Standardtests sowie hinreichend viel Erfahrung und Wissen [2]. Im Bereich von Schneckenantrieben hat es schon Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von Schmierfetten auf die Tragfähigkeit und den Wirkungsgrad gegeben [3]. Bei lebensdauergeschmierten Lineargleitlagern oder Spindeltrieben mit einem sehr viel

höheren Gleitanteil und größeren Gleitwegen gibt es hingegen kein vergleichbares Know-how. Es ist von der Theorie her unstrittig, dass *Haftung*, *innere Festigkeit* und *Klebrigkeit* den Verbleib von Schmierfetten im System und an den Reibflächen, wie sie z. B. in elektromechanischen Brems- und Kupplungssystemen oder Fensterhebern zu finden sind, bestimmen. Diskutiert wird jedoch, wie diese Größen an Schmierfetten zu ermitteln sind [4] und in welcher Beziehung sie zu anderen bekannten Größen wie Water-Wash-Out [5], Water-Spray-Off [6] oder Konuspenetration [7] stehen [8]. In der Literatur finden sich keine nennenswerten Hinweise darauf, wie das optimale Zusammenspiel dieser Größen aussehen sollte und welche Relevanz sie für lebensdauer-geschmierte Gleitsysteme tatsächlich haben.

Tribologisch beanspruchte Kontaktflächen lebensdauer-geschmierter Systeme laufen mit der Zeit trocken, was unweigerlich zum Systemausfall führt. Davon sind besonders Tribosysteme betroffen, bei denen das Schmierfett über weite Wege geschoben wird. Ein solcher Verarmungsprozess verliert an Bedeutung, wenn verdrängtes Schmierfett aufgrund seiner Klebrigkeit im geringeren Umfang verdrängt wird. Weil es für solche lebensdauer-geschmierten Tribosysteme derzeit keine genormten Tests gibt, werden Entscheidungen für oder gegen bestimmte Schmierfetttypen auf Basis von Erfahrungswerten und auf Basis von Ergebnissen von Standardprüfverfahren (z. B. NLGI Klasse [9], Walkpenetration [10], Tropfpunkt [11]) und/oder von praxisbezogenen internen Prüfungen getroffen. Obwohl eine Korrelation zwischen Mangelschmierung und geringer Schmierfettklebrigkeit zu erwarten ist, stehen eine Definition des Begriffs *Schmierfettklebrigkeit* [12], [13] und ein genormtes Prüfverfahren zur Bestimmung einer *Schmierfettklebrigkeit* noch aus.

Eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema Schmierfettklebrigkeit beginnt mit Achante et al. [16]. Er prüfte die *Schmierfettklebrigkeit* in Anlehnung an die Tackiness-Prüfungen für Haftklebstoffe [17]. Mit dieser Prüfmethodik ergeben sich eine *maximale Kraft* zum Herauslösen eines Prüfkörpers aus dem Schmierfett, die damit verbundene *Fadenlänge* und die *Trennarbeit*. An Schmierfetten ohne Tackifier konnte nachgewiesen werden, dass der Verdicker die Klebrigkeit entscheidend beeinflusst. Georgiou et al. entwickelten diese Methode weiter. Sie zeigten auf, dass die Ergebnisse solcher Messungen von den Messbedingungen (Verfahrgeschwindigkeit, Schmierfettfilmdicke, Schmierfettbelastung und Temperatur) abhängen. Unter Anwendung eines standardisierten Parametersets konnten sie unterschiedliche Industrieschmierstoffe sensitiv anhand ihrer Klebrigkeit unterscheiden [19] und qualitativ auf Verdickertyp, Verdickergehalt und Tackifiergehalt rückschließen. In einer aktuellen Veröffentlichung zeigen sie einen Weg zur reproduzierbaren Quantifizierung der Kenngrößen *Fadenlänge*, *maximale Abziehkraft* und *Trennarbeit* auf [13]. Auf Basis dieser und vergleichbarer Ergebnisse [16], [18], [19] hat die Fa. Falex erst kürzlich einen *Tackiness Adhesion Analyser* auf den Markt gebracht [20].

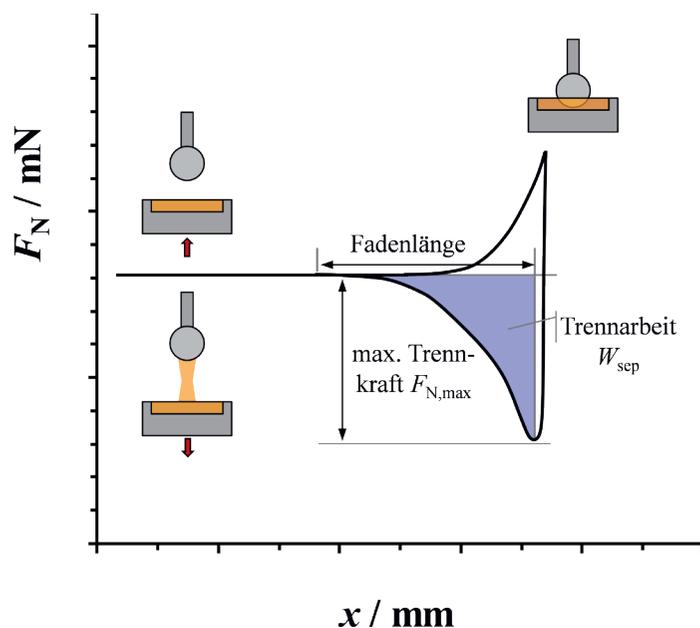


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Klebrigkeitsmessung nach Achante et al. [16]. Ein kugelförmiger Prüfkörper wird in einen Schmierfettfilm gedrückt und wieder herausgezogen. Gemessen wird die Normalkraft. Dabei anfallende Kenngrößen sind die Fadenlänge, die maximale Abziehkraft und die Trennarbeit. (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

3. Ziele des Forschungsprojekts

Aufgrund der offensichtlichen Relevanz einer Bestimmung der Schmierfettklebrigkeit hat sich der Normenarbeitskreis (NAK) DIN 51810 dieser Thematik angenommen, um ein einfaches und robustes Prüfverfahren mit Rheometern, die ein Standardprüfgerät bei Schmierfettentwicklern und -anwendern ist, zu entwickeln. Erste orientierende Messungen mithilfe luftgelagerter Oszillationsrheometer wurden schon in einem Ringversuch durchgeführt [12]. Die unterschiedlichen Messabläufe und Auswertungen der teilnehmenden Normarbeitskreis-Mitglieder führten zu einer großen Varianz in den Ergebnissen, weshalb eine belastbare Interpretation der Messergebnisse und ein belastbares Verständnis dafür, welchen Einfluss Messparameter, Plattenmaterial und Schmierstoffeigenschaften auf die Ergebnisse solcher Messungen haben, noch aussteht.

Das Vorlauftorschungsprojekt hat sich zum Ziel gesetzt, ein einfaches und robustes Messverfahren zur Bestimmung der *Schmierfettklebrigkeit* zu entwickeln, den Begriff der *Schmierfettklebrigkeit* zu definieren und den Einfluss von Messparametern, Plattenmaterial und Schmierstoffeigenschaften auf die Ergebnisse dieser Messungen eindeutig zu klären. Dazu soll die im Normenarbeitskreis (NAK) DIN 51810 vorgeschlagene Herangehensweise grundsätzlich übernommen werden, da sie von industriellen Anwendern einfach umsetzbar ist.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Abbildung 3 zeigt die dem Projekt zugrunde liegende Vorgehensweise. In einem ersten Schritt wurde die Prüfmethode entwickelt und eine SOP (*Standard Operation Procedure*) festgelegt. Die SOP ist dann auf definierte Modellschmierfette und auf kommerzielle Schmierfette angewendet worden, um die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisgrößen zu ermitteln. In einem weiteren Schritt wurde dann der Einfluss der Materialbeschaffenheit von Prüfflächen untersucht. Der vorletzte Schritt war die Übertragung der SOP auf einen anderen Rheometertyp. Im letzten Schritt wurden alle bislang erzielten Ergebnisse zusammengefasst und hinsichtlich ihrer Aussagekraft hinterfragt. Es galt zu klären, welche Zusammenhänge zwischen Schmierfetteigenschaften, Messparametern und äußeren Parametern noch nicht (eindeutig) geklärt sind. Erst nach einer Klärung noch offener Fragen kann die Prüfmethodik inklusive der Interpretation von Messergebnissen veröffentlicht werden.

Da „normale“ Rheometer eine relativ schlechte Wegauflösung von 63 μm und eine Kraftauflösung von 10 mN in Normalkraftrichtung haben, ist für die Methodenentwicklung ein Rheometer MCR702 MultiDrive der Fa. Anton Paar mit Linearantrieb verwendet worden. Bei einem Linearantrieb handelt es sich um einen Rheometereinsatz, mit dem „DMA-Messungen“ (linear und oszillatorisch: $10^{-3} \dots 10^2$ Hz) in Normalkraftrichtung durchgeführt werden können. Der Linearantrieb verbessert die Empfindlichkeit in der Wegauflösung um den Faktor 6300 und in der Kraftauflösung um den Faktor 20. Eine Temperierkammer CTD180 ermöglicht Messungen im Temperaturbereich von -20 °C ... $+180$ °C und ein zugehöriges Kamerasystem eine Bild- und Videodokumentation der Messungen.

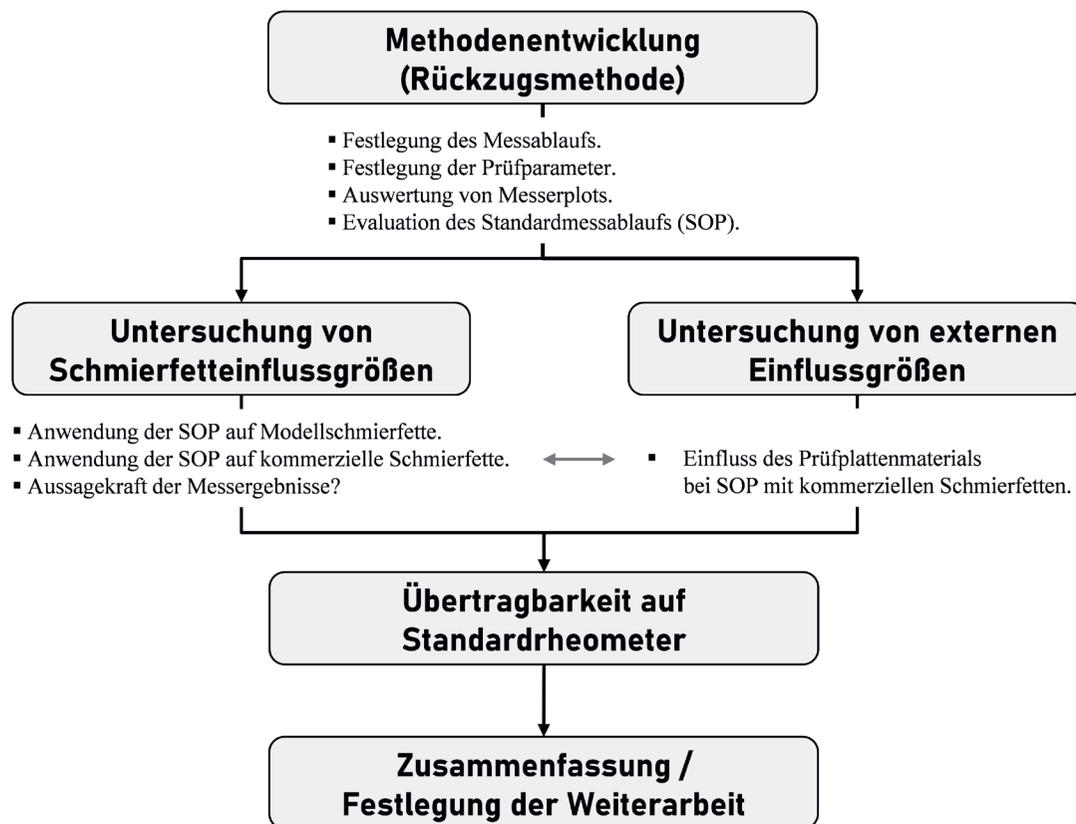


Abb. 2: Schematische Darstellung der Projektstruktur (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

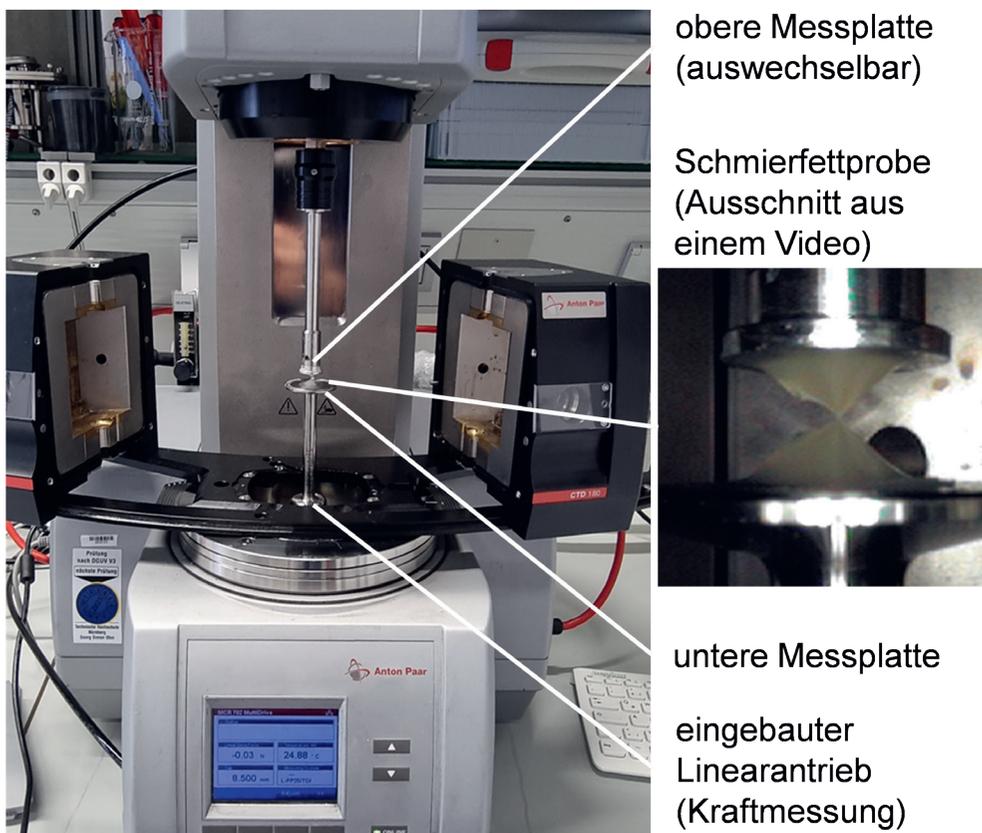


Abb. 3: Foto des Rheometers MCR702 MultiDrive der Fa. Anton Paar mit eingebautem Linearantrieb. (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Da ein Zusammenhang zwischen Messergebnissen und Schmierfettzusammensetzung nur dann diskutiert werden kann, wenn die genaue Zusammensetzung der Schmierfette bekannt ist, sind im Labor für Physikalische Chemie zwei Modellschmierfettreihen hergestellt worden. Die Schmierfette beider Reihen beruhen auf Li-12-Hydroxystearat als Verdicker und auf Esteröl bzw. paraffinischem Mineralöl als Grundölen. Die genauen Zusammensetzungen der hergestellten Schmierfette finden sich in Tabelle 1. Parallel dazu sind auch Messungen an kommerziellen Schmierfetten der Fa. Klüber durchgeführt worden. Diese Schmierfette basieren auf anderen Grundölen (PFO, PAO) und Verdickersystemen (Ca-Seifen; PTFE-Partikel - Tabelle 1). Messungen an diesen Schmierfetten sollten sicherstellen, dass die Messmethodik bei handelsüblichen Schmierfetten zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

Abk.	Schmierfett-zusammensetzung	Walkpenetration PW / 0,1 mm	Ruhepenetration PU / 0,1 mm	NLGI-Klasse (W / R)
VAC1*	Perfluorpolyetheröl (PFO) mit PTFE-Verdicker	310 - 340	339 ± 4	1 / 1
VAC2*	Perfluorpolyetheröl (PFO) mit PTFE-Verdicker	265 - 295	275 ± 10	2 / 2
VAC3*	Perfluorpolyetheröl (PFO) mit PTFE-Verdicker	220 - 250	228 ± 10	3 / 3
NCA51*	PAO mit Ca-Seife	---	258 ± 10	--- / 2-3
NCA52*	PAO mit Ca-Seife	265 - 295	244 ± 6	2 / 3
NCA5051*	PAO mit Ca-Seife	385 - 415	375 ± 5	00 / 0
EOX	Modellschmierfettreihe auf Basis von Esteröl** und X Ma% Li-12-Hydroxystearat***		X = 9 Ma%: 358 ± 5 X = 10 Ma%: 320 ± 9 X = 11 Ma%: 287 ± 9 X = 12 Ma%: 265 ± 2 X = 13 Ma%: 249 ± 6 X = 15 Ma%: 240 ± 4	--- / 0 --- / 1 --- / 2 --- / 2 --- / 3 --- / 3
MOX	Modellschmierfettreihe auf Basis von paraffinischem Mineralöl** und X Ma% Li-12-Hydroxystearat***		X = 8 Ma%: 377 ± 13 X = 10 Ma%: 369 ± 6 X = 12 Ma%: 348 ± 6 X = 14 Ma%: 318 ± 14 X = 16 Ma%: 3279 ± 6	--- / 0 --- / 0 --- / 0-1 --- / 1-2 --- / 2
ANO10	Modellschmierfett auf Basis von alkylierten Naphthalinöl**** und 10 Ma% Li-12-Hydroxy-stearat***		276 ± 7	--- / 2

Tab. 1: Abkürzung, Zusammensetzung und die wichtigsten Eigenschaften der verwendeten Schmierfette.

Abkürzungserklärung: PAO: Polyalphaolefin; MO: Mineralöl; EO: Esteröl; PFO: Perfluoretheröl; ANO: alkyliertes Naphthalinöl;

Grundöle und den Verdicker Li-12-Hydroxystearat haben folgende Firmen zur Verfügung gestellt: * Fa. Klüber; ** Fa. KAJO; *** Fa. Fuchs; **** Fa. Castrol;

Modellschmierfette wurden im Labor Physikalische Chemie der Fakultät Angewandte Chemie hergestellt;

Bestimmung der Walkpenetration (P_w) bzw. Ruhepenetration (P_r) mit einem Viertelkonus nach DIN ISO 2137 [7]; Bestimmung der NLGI-Klasse nach DIN ISO 6743-99 [14].

Methodenentwicklung (Rückzugsmethode)

Alle bislang veröffentlichten Messmethoden basieren im Wesentlichen auf dem Rückzugsversuch. Beim Rückzugsversuch wird eine Messplatte mit einem Schmierfett in Kontakt gebracht und von dieser „Nulllage“ ausgehend die Messplatte wieder vom Schmierfett abgezogen. Gemessen wird dabei die notwendige Kraft. Diese Vorgehensweise ist auf die Messsituation in einem Rheometer mit Linearantrieb übertragen worden. Hier bewegt sich nicht die obere, sondern die untere Messplatte, auf der das Schmierfett aufgebracht ist. Abbildung 5 visualisiert den Messablauf und Abbildung 6 einen dazugehörigen Messplot.

1. Untere und obere Messplatte werden in eine „Ladeposition“ gefahren.
2. Auf die untere Messplatte wird das zu prüfende Schmierfett aufgebracht.
3. Die untere Messplatte fährt so weit auf die obere Messplatte zu, dass die gewünschte Spalthöhe h nahezu erreicht ist.
4. Die Schmierfettprobe wird getrimmt, d. h., überschüssiges Schmierfett wird entfernt und danach die gewünschte Spalthöhe h angefahren.
5. Die untere Messplatte wird zurückgefahren und die dadurch entstehende Abziehungskraft gemessen.
6. Der Versuch ist abgeschlossen, wenn die maximale Auslenkung erreicht ist.

Aus einem solchen Rückzugsversuch ergeben sich als Ergebnisgrößen *Fadenlänge* x_{\max} , *maximale Abziehungskraft* $F_{A,\max}$ und *Trennarbeit* W_T . Vorgegebene Messparameter waren bei der Methodenentwicklung *Rückzugsgeschwindigkeit* v_R (0,5 und 1,0 mm s⁻¹), *Spalthöhe* h (1,0; 1,5 und 2,0 mm), *Plattendurchmesser* d_p (8, 12, 15 mm) und *Kompressionskraft* F_K (5 und 10 N). Der Einfluss der Parameter auf die Messgrößen ist an den drei kommerziellen Schmierfetten VAC1 - VAC3 (Tabelle 1) der Fa. Klüber Lubrication überprüft worden. Die Schmierfette unterscheiden sich in ihren NLGI-Klassen (DIN ISO 6743-99 [14]) und damit in ihren Festigkeiten (NLGI-Klasse 1: weich; NLGI-Klasse 3: fest). Die NLGI-Klasse ist als Zahl am Ende der Kurzbezeichnung VAC angegeben.

Jede Messung wurde 5-fach durchgeführt, um den Medianwert, die Standardabweichung und die Quartile angeben zu können. Diese Vorgehensweise gilt für alle im Rahmen des Projekts durchgeführten Messungen.

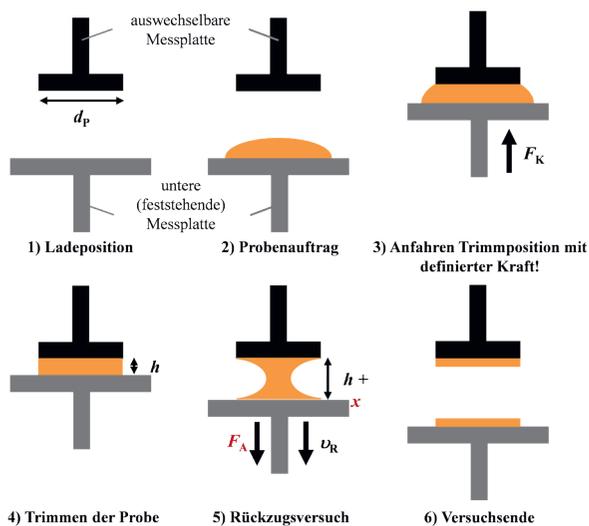


Abb. 4: Die schematische Ablaufdarstellung verdeutlicht die wichtigsten Messparameter Plattendurchmesser (d_p), Spalthöhe (h), Kompressionskraft (F_K) und Rückzugsgeschwindigkeit (v_R) sowie die Zugehörigkeit der Messgrößen Abziehungskraft (F_A) bzw. Auslenkung (x) zu den einzelnen Messphasen. (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

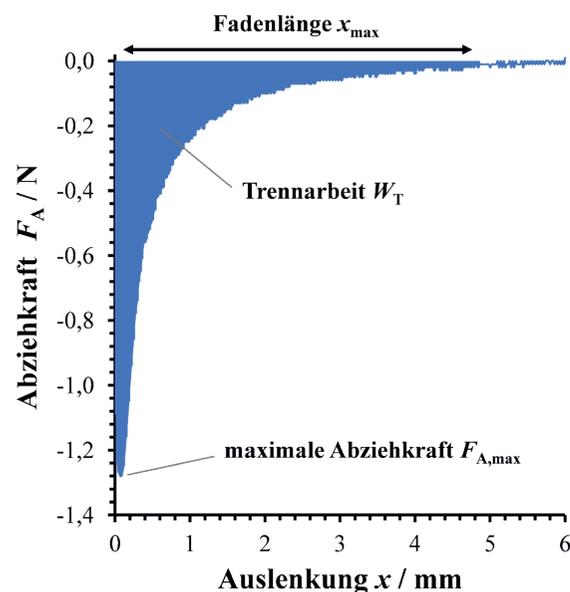


Abb. 5: Typischer Messplot eines Rückzugsversuchs. Zu entnehmen sind die maximale Abziehungskraft ($F_{A,\max}$), die Fadenlänge (x_{\max}) und die Trennarbeit (W_T). Die maximale Fadenlänge ergibt sich aus der Auslenkung, ab der die Abziehungskraft über 10 Messpunkte hinweg einen konstanten Wert (\pm Auflösung) beibehält. Die Trennarbeit ergibt sich aus der Integration der Abziehungskraft bis zur Fadenlänge x_{\max} . (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Eine systematische Überprüfung des Einflusses der Parameter Rückzugsgeschwindigkeit, Spalthöhe, Plattendurchmesser und Kompressionskraft führte zu folgenden Ergebnissen:

Rückzugsgeschwindigkeit v^R : Eine Zunahme der Rückzugsgeschwindigkeit von 0,5 auf 1,0 mm s⁻¹ führt zu einer Zunahme von maximaler Fadenlänge x_{\max} , Abziehungskraft F_A und Trennarbeit W_T . Da die Messwertstreuung aber überproportional ansteigt, ist eine Rückzugsgeschwindigkeit von 0,5 mm s⁻¹ geeigneter als eine von 1,0 mm s⁻¹.

Spalthöhe h : Mit einer Zunahme der Spalthöhe von 1,0 auf 1,5 und 2,0 mm werden die Messwerte von maximaler Fadenlänge x_{\max} , Abziehungskraft F_A und Trennarbeit W_T kleiner. Die Messwerte liegen bei einer Spalthöhe von 1,0 mm im optimalen Messbereich.

Plattendurchmesser d_P : Eine Zunahme der Plattengröße von 8 auf 12 und 15 mm führt zu größeren Werten der maximalen Fadenlänge x_{\max} , Abziehungskraft F_A und Trennarbeit W_T . Das günstigste Signal-Rausch-Verhältnis ergibt sich bei einem Plattendurchmesser von 15 mm.

Kompressionskraft F_K : Eine Zunahme der Kompressionskraft von 5 auf 10 N führt zu einer signifikanten Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses bei allen Ergebnisgrößen.

Die erzielten Ergebnisse sind Grundlage für die Definition eines Standardparametersatzes:

Parameter	Wert	Parameter	Wert
Plattendurchmesser d_p / mm	15	Rückzugsgeschwindigkeit v^R / mm s ⁻¹	0,5
Kompressionskraft F_K / N	10	Temperatur / °C	25
Spalthöhe h / mm	1,0	Anzahl Messungen pro Messpunkt	5

Tab. 2: Festgelegter Standardparametersatz.

Eine Evaluation des Standardparametersatzes hinsichtlich Temperaturkonstanz, Reproduzierbarkeit und Empfindlichkeit fand am Beispiel des Modellschmierfettes ANO10 statt. Die Temperaturstreuung war über alle Messungen hinweg geringer als 1,3 %. Die Streuung der Messgrößen Fadenlänge x_{\max} , maximale Abziehungskraft $F_{A,\max}$ und Trennarbeit W_T ist signifikant davon beeinflusst worden, ob eine Messplatte PP15 aus Edelstahl oder Einwegmessplatten D-PP15 aus Aluminium benutzt wurden. Die ermittelten Fadenlängen sind auch optisch mithilfe eines Kamerasystems überprüft worden. Die Evaluation ergab, dass die optisch ermittelten Werte x_{\max} ca. 25 % größer sind als die, die sich aus den Kraftmessungen ergeben. Da die kraftgesteuerte Bestimmung der Fadenlänge einfach und genau definiert ist und die sich daraus ergebenden Werte reproduzierbar sind, wurde im Weiteren die kraftgesteuerte Fadenlängenbestimmung konsequent angewendet.

Messgröße	Streuung Messplatte PP15	Streuung Einwegmessplatte D-PP15/AL/S07
Fadenlänge x_{\max}	18 %	18 %
Maximale Abziehungskraft $F_{A,\max}$	3 %	20 %
Trennarbeit W_A	5 %	20 %

Tab. 3: Streuungen für Messplatte PP15 (Edelstahl) und Einwegmessplatte D-PP15 (Aluminium) unter Anwendung des Standardparametersatzes (Tabelle 2) und des Modellschmierfettes ANO10. Die angegebenen Streuungen basieren auf jeweils 5 Einzelmessungen.

Untersuchung von Schmierfetteinflussgrößen

Die „Klebrigkeit“ zweier Modellschmierfettreihen MOX und EOX (Tabelle 1), die sich in ihren Grundölen unterscheiden, sind auf Basis des Standardparametersatzes (Tabelle 2) mit D-PP15-Einwegmessplatten bestimmt worden.

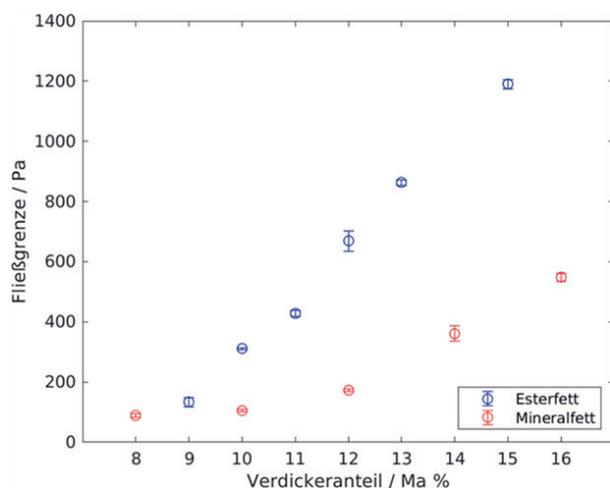


Abb. 6: Einfluss des Verdickeranteils der Modellschmierfettreihen MOX und EOX auf die Fließgrenze (DIN51810-2 [15]). Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

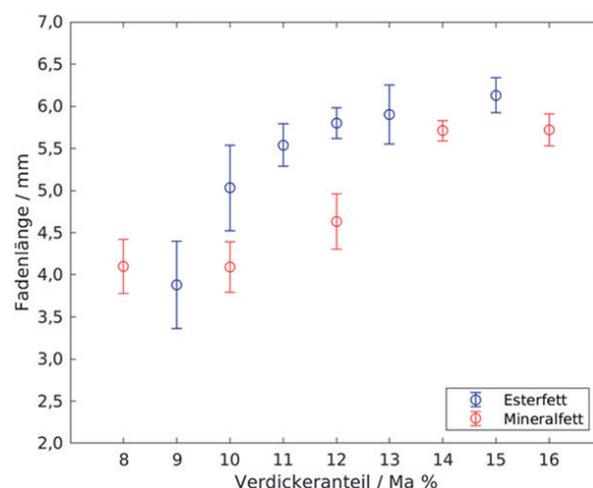


Abb. 7: Einfluss des Verdickeranteils der Modellschmierfettreihen MOX und EOX auf die Fadenlänge. Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Um den Einfluss von Verdickeranteil und Grundöl eingehend diskutieren zu können, wurden an allen Modellschmierfetten die Fließgrenzen nach DIN51810-2 [15] bestimmt. Die Fließgrenze entspricht der notwendigen Kraft, um ein viskoelastisches Material in Scherung zum „Fließen“ zu bringen. Damit ist die Fließgrenze ein Maß für die Festigkeit eines Materials. Abbildung 7 zeigt deutlich, dass mit zunehmendem Verdickeranteil die Schmierfette fester werden und dass dieser Effekt beim Esterfett (EOX) ausgeprägter als beim Mineralölfett (MOX) ist. Bei beiden Modellschmierfettreihen zeigen die gemessenen Fadenlängen keine eindeutige Korrelation zu den Verdickeranteilen (Abbildung 8). Ganz anders sieht das bei der max. Abziehungskraft $F_{A,\max}$ (Abbildung 9) und der Trennarbeit W_T (Abbildung 10) aus. Hier sind die Streuungen so gering, dass sich für beide Modellschmierfettreihen eindeutige Zusammenhänge ergeben.

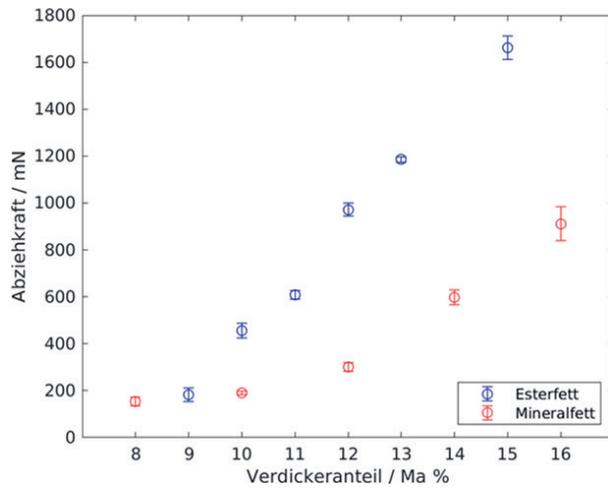


Abb. 8: Einfluss des Verdickeranteils der Modellschmierfettreihen MOX und EOX auf die maximale Abziehkraft. Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

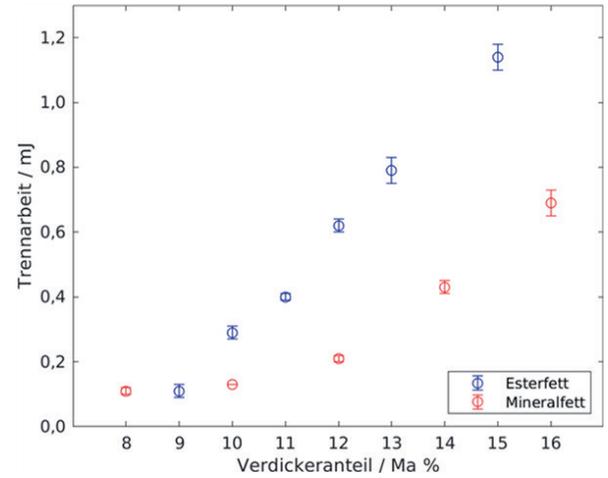


Abb. 9: Einfluss des Verdickeranteils der Modellschmierfettreihen MOX und EOX auf die Trennarbeit. Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Ein Paritätsdiagramm von maximaler Abziehkraft $F_{A,max}$ und der Trennarbeit W_T (Abbildung 11) ergibt für beide Modellschmierfettreihen jeweils einen linearen Zusammenhang. Das bedeutet, dass nur eine der beiden Größen gemessen werden muss. Dass beide Größen maßgeblich vom Verdickeranteil bestimmt werden, zeigen die linearen Korrelationen zwischen Fließgrenze und Trennarbeit (Abbildung 12).

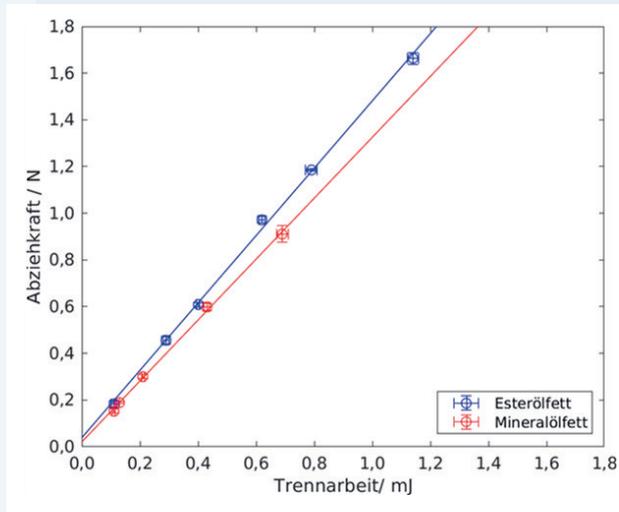


Abb. 10: Korrelation von max. Abziehkraft $F_{T,max}$ und Trennarbeit W_T für die Modellschmierfettreihen MOX und EOX. Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

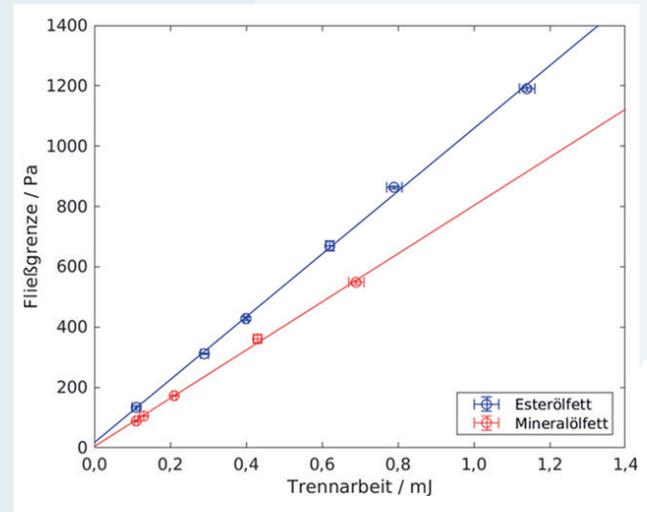


Abb. 11: Korrelation von Trennarbeit W_T und Fließgrenze τ für die Modellschmierfettreihen MOX und EOX. Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Die „Klebrigkeiten“ kommerzieller Schmierfette (Tabelle 1) wurden auf Basis des Standardparametersatzes (Tabelle 2) mit D-PP15-Einwegmessplatten bestimmt. Die Darstellung der an den kommerziellen Schmierfetten erzielten Ergebnisse erfolgt im Vergleich zu den Modellschmierfetten EO12, MO12 (Abbildung 13).

Im Gegensatz zu den Modellschmierfetten bestehen kommerzielle Schmierfette nicht nur aus Grundöl und Verdicker, sondern sie enthalten darüber hinaus auch Additive (z. B. Antioxidantien, Tackifier). Hier stellt sich die Frage, ob sich für solche Schmierfette ebenso wie für die Modellschmierfette eine Korrelation zwischen Ergebnisgrößen und NLGI-Klassen nachweisen lässt.

Wie die Modellschmierfette so lassen sich auch die kommerziellen Schmierfette anhand der maximalen Fadenlänge x_{\max} nicht eindeutig voneinander unterscheiden. Die maximale Abziehkraft $F_{A,\max}$ ist hierfür schon besser geeignet. Eine eindeutige Differenzierung ist aber ausschließlich anhand der Trennarbeit W_T (Abbildung 13) möglich. Wesentlich erscheinen folgende Ergebnisse:

- die Trennarbeit nimmt mit steigender NLGI-Klasse zu, wenn das Grundöl gleichbleibt (PFO: VAC1 → VAC2 → VAC3; PAO: NCA5051 → NCA51 → NCA52).
- die Trennarbeiten sind bei gleicher NLGI-Klasse unterschiedlich, wenn Grundöl und/oder Verdickersystem nicht identisch sind (VAC1 ↔ Mineral12 / VAC2 ↔ Ester12 / VAC3 ↔ NCA52).

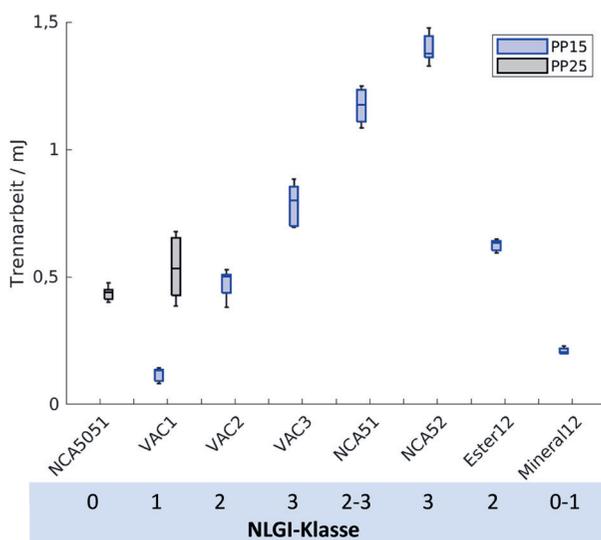


Abb. 12: Abhängigkeit der Trennarbeit W_T von der NLGI-Klasse verschiedener Schmierfette. Jeder Messpunkt basiert auf 5 Messungen. [21] Die Trennarbeiten der verschiedenen Schmierfette lassen sich deutlich separieren. Eine eindeutige Zuordnung der Trennarbeit zu einer NLGI-Klasse ist nicht möglich. (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

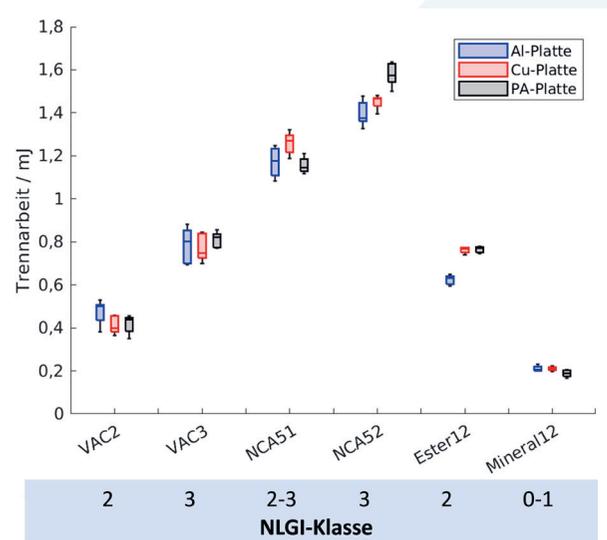


Abb. 13: Zusammenhang von Trennarbeit W_T und der NLGI-Klasse von verschiedenen Schmierfetten gemessen an D-PP15-Platten (Einwegmessplatten) mit unterschiedlichen Oberflächen [21]. Die Trennarbeiten der verschiedenen Schmierfette lassen sich deutlich separieren. Der Einfluss der Oberflächenpolarität ist eher gering, aber nicht vernachlässigbar. (Bild: Fakultät Angewandte Chemie)

Untersuchung von externen Einflussgrößen

Die vorangegangenen Rückzugsmessungen sind mit D-PP15-Einwegmessplatten aus Aluminium durchgeführt worden. Um einen Einfluss des Messplattenmaterials auf die Ergebnisse nachvollziehen zu können, erfolgten auch Messungen mit beschichteten D-PP15-Einwegmessplatten. Beschichtungsmaterialien waren Kupfer und Polyamid. Polyamidoberflächen sind relativ unpolar, Kupfer im Vergleich dazu etwas polarer. Quantitative Angaben zur Oberflächenenergie und Oberflächenpolarität finden sich im Text zu Abbildung 15.

Ebenso wie bei den vorangegangenen Rückzugsmessungen sind Fadenlänge x_{\max} und maximale Abziehkraft $F_{A,\max}$ wenig geeignete Ergebnisgrößen zur Differenzierung der verwendeten Schmierfette. Auch hier ist eine eindeutige Differenzierung ausschließlich anhand der Trennarbeit möglich (Abbildung 14). Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Oberflächenpolarität einen eher untergeordneten Einfluss auf die Trennarbeit nimmt. Eine Ausnahme scheint beim Ester12 vorzuliegen. Hier handelt es sich um ein Schmierfett mit 12 Ma% Li-12-Hydroxy-Stearat als Verdicker und Esteröl als Grundöl. Hier führt eine geringe Oberflächenpolarität scheinbar zu einer etwas höheren Trennarbeit.

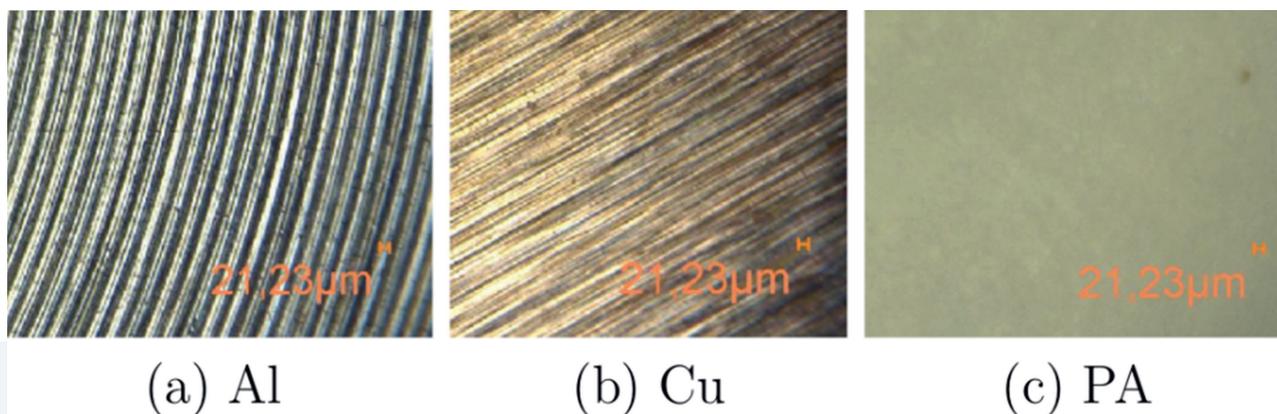


Abb. 14: Oberflächen der verwendeten D-PP15-Einwegmesssysteme (Mikroskopieaufnahmen mit 100-facher Vergrößerung).

a) Aluminium: Oberflächenenergie: $40,6 \pm 1,9 \text{ mN m}^{-1}$, polarer Anteil: 14 %;

b) aufgeklebte Kupferfolie: Oberflächenenergie: $35,9 \pm 1,0 \text{ mN m}^{-1}$, polarer Anteil: 5 %;

c) Polyamid-Schmelzkleberschicht: Oberflächenenergie: $22,3 \pm 2,4 \text{ mN m}^{-1}$, polarer Anteil: 1 %. (Bilder: Fakultät Angewandte Chemie)

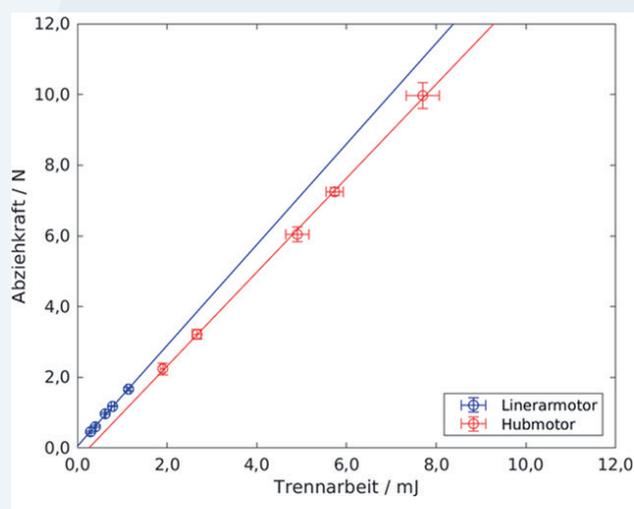


Abb. 15: Zusammenhang von maximaler Abziehkraft $F_{A,max}$ und Trennarbeit W_T , ermittelt an einem Rheometer MCR702 mit Linearantrieb und an einem Rheometer MCR301 mit einem Hubmotor. [21], [22] Alle Messungen sind an der Modellschmierfettreihe EOX ($X = 10...15 \text{ Ma}\%$) durchgeführt worden. Die Korrelationen von Abziehkraft und Trennarbeit sind für Linear- und Hubmotor aufgrund der unterschiedlichen Definitionen der Fadenlänge nicht identisch.

Übertragbarkeit auf Standardrheometer

Die vorangegangenen Rückzugsmessungen sind an einem MCR702 mit eingebautem Linearantrieb durchgeführt worden. Eine solche Messausrüstung ist kein Standard in einem Prüflabor. Aus diesem Grund wurde die Prüfvorschrift (SOP: Tabelle 2) auf ein luftgelagertes „Standardrheometer“ des Typs MCR301 angepasst. Die Auswertung der Messplots zur Bestimmung der Fadenlänge x_{max} musste aufgrund des wesentlich schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses geändert werden. Die Fadenlänge gilt bei einem Standardrheometer mit Hubmotor als dann erreicht, wenn die Abziehkraft F_A einen vorgegebenen Schwellenwert unterschreitet. Da die Trennarbeit sich aus der Integration der Abziehkraft bis zur Fadenlänge x_{max} ergibt, hat diese Definition natürlich auch einen Einfluss auf die Werte der Trennarbeit W_T .

Ein Vergleich der Ergebnisse, die mit beiden Rheometertypen erzielt wurden, ergibt, dass sich die Absolutwerte von Fadenlänge x_{max} , Abziehkraft F_T und Trennarbeit W_T unterscheiden, hinsichtlich ihrer Aussagekraft aber im Wesentlichen gleich sind. Es ist noch zu klären, auf welche Weise die Ergebnisse, die an unterschiedlichen Rheometern ermittelt werden, sich ineinander umrechnen lassen.

Zusammenfassung

Schmierfette lassen sich hinsichtlich ihrer Klebrigkeit mit Rückzugsversuchen unter Zuhilfenahme von Standardparametern (Tabelle 2) reproduzierbar charakterisieren. Beim Rückzugsversuch wird zuerst eine Messplatte mit einem Schmierfett in Kontakt gebracht und von dieser „Nulllage“ ausgehend mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit wieder entfernt (Abbildung 5). Gemessen wird dabei die notwendige Abziehkraft F_A in Abhängigkeit des Weges x . Aus einem solchen F_A - x -Messplot ergeben sich maximale Fadenlänge x_{\max} , Abziehkraft F_A und Trennarbeit W_T (Abbildung 6) als Ergebnisgrößen. Unterschiedliche Messreihen an Modellschmierfetten und kommerziellen Schmierfetten zeigen auf, dass Fadenlänge x_{\max} und maximale Abziehkraft $F_{A,\max}$ wenig geeignete Ergebnisgrößen zur Differenzierung von Schmierfetten sind, die Trennarbeit W_T hingegen eine eindeutige Differenzierung zulässt. Da die Trennarbeit als integrale Größe gegenüber experimentellen Einflüssen auch wesentlich unempfindlicher ist als Fadenlänge x_{\max} und maximale Abziehkraft $F_{A,\max}$ und sie eine eindeutige Differenzierung von Schmierfetten zulässt, erscheint es sinnvoll, zukünftig die Trennarbeit W_T als Kenngröße für die Klebrigkeit von Schmierfetten heranzuziehen.

Weiterarbeit

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen auf, dass eine reproduzierbare Bestimmung der Schmierfettklebrigkeit mit Rheometern möglich ist. Obwohl das erarbeitete Prüfverfahren hinsichtlich seiner Durchführung sehr robust ist, steht eine schlüssige Interpretation aller erzielten Messergebnisse aus. Folgende Fragen können noch nicht ausreichend beantwortet werden:

- Welchen Anteil an den Ergebnisgrößen Fadenlänge x_{\max} , maximale Abziehkraft $F_{A,\max}$ und Trennarbeit W_T hat die Viskosität des Grundöles und welchen Anteil die Viskoelastizität der Verdickerstruktur?
- Wie stark ist der Einfluss der Temperatur?
- Welchen Einfluss haben Polymere als Additive wie Tackifier?
- Welchen Einfluss haben kleine Moleküle als Additive wie Antioxidantien?
- Welchen Einfluss hat die Polarität des Grundöles bzw. die Benetzung der Messplatten?

Die Klärung dieser Fragen erscheint notwendig, damit aus Rückzugsmessungen korrekte Schlussfolgerungen gezogen werden können und damit die Ergebnisse von Rückzugsversuchen helfen, das reale Verhalten von Schmierfetten in Gleitlagern zu verstehen. Hierzu laufen noch Untersuchungen bis Mitte 2022.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Unabhängig von den noch zu klärenden Fragen sind Ende Oktober 2021 die wichtigsten Ergebnisse dem DIN-Arbeitskreis NAK 51810 vorgestellt worden. Die Präsentation fand eine große Aufmerksamkeit, weil das vorgestellte Prüfverfahren zu deutlich reproduzierbareren Ergebnissen als das bislang im Normenarbeitskreis angewendete Prüfverfahren führt. Damit sind Schmierfette hinsichtlich ihrer „Klebrigkeit“ eindeutig voneinander zu unterscheiden. Diskutiert wurde auf Basis der vorgelegten Ergebnisse, welche Schlussfolgerungen für das reale Verhalten von Schmierfetten in Gleitlagern und Spindelantrieben gezogen werden dürfen. Übereinstimmung wurde darin erzielt, dass das FVA-Vorhaben T-1571 *Entwicklung einer Prüfstrategie zur Qualifizierung von Schmierfetten für lebensdauergeschmierte Lineargleitlager und Spindelantriebe* die entscheidende Basis für die Beantwortung dieser Frage ist.

Der Antragsteller hat zusammen mit Dr. Markus Grebe (Hochschule Mannheim) den oben erwähnten Forschungsantrag *Entwicklung einer Prüfstrategie zur Qualifizierung von Schmierfetten für lebensdauergeschmierte Lineargleitlager und Spindelantriebe* über die *Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA)* bei der *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF)* eingereicht. Dr. Markus Grebe ist Leiter des *Kompetenzzentrums Tribologie Mannheim (KTM)*. Das Kompetenzzentrum ist spezialisiert auf die Optimierung maschinenbaulicher Tribosysteme unter Einsatz praxisnaher, mechanisch-dynamischer Untersuchungen. Hierzu stehen über 50 unterschiedliche Tribometer sowie die notwendige Analytik zur Verfügung. Das gemeinsame Forschungsprojekt ist für die Zeitdauer von 30 Monaten geplant. Es beinhaltet 2 wissenschaftliche Mitarbeiter*innen-Stellen. Eine der beiden Stellen ist für die TH Nürnberg vorgesehen. Die Forschungsvereinigung Antriebstechnik

(FVA) ebenso wie der Normenarbeitskreis 51810 unterstützen diesen Antrag bei der AiF.

Bis Mitte 2022 werden alle noch ausstehenden Versuche zu diesem Themenkomplex abgeschlossen sein. Die erzielten Ergebnisse sollen dann über eine bekannte anwendungsorientierte Zeitschrift (z. B. Lubricants) veröffentlicht werden. Die Ergebnisse werden Grundlage eines weiteren Ringversuchs des Arbeitskreises DIN 51810 und Grundlage für eine Norm DIN 51810-x: *Prüfung von Schmierstoffen – Bestimmung der Klebrigkeit von Schmierfetten mit Rheometern* sein.

6. Literatur

- [1] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: Schmierung von Wälzlagern – Grundlagen, Schmiervverfahren, Schmierstoffauswahl- und Prüfung, Aufbewahrung und Handhabung; Ausgabe 2013, März.
- [2] A. Monz; *Tragfähigkeit und Wirkungsgrad von Schneckengetrieben bei Schmierung mit konsistenten Getriebefetten*; Dissertation am Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik - Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität München; 2012.
- [3] S. Achanta; M. Jungk; D. Drees: *Characterisation of cohesion, adhesion, and tackiness of lubricating greases using approach–retraction experiments*; Tribology International; 44 (10), 1127–1133, 2011.
- [4] ASTM D1264-18e1: *Standard Test Method for Determining the Water Washout Characteristics of Lubricating Greases*; ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [5] ASTM D4049–16: *Standard Test Method for Determining the Resistance of Lubricating Grease to Water Spray*; ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [6] DIN ISO 2137:2016-12: *Mineralölerzeugnisse und Schmierstoffe - Bestimmung der Konuspenetration von Schmierfetten und Petrolatum (zurückgezogen)*.
- [7] A. Kumar, R. Shah, C. Miller; *Comparative and Correlative Studies of Water Resistance, Tackiness and Low-Temperature Properties in a Wide Range of Greases*; NLGI Spokesman, 2020, 84(4), 40–52.
- [8] DIN 51818: 1981-12: *Schmierstoffe; Konsistenz-Einteilung für Schmierfette; NLGI-Klassen*.
- [9] ASTM D217-19b: *Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease*; ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
- [10] IP 396: 2017: *Determination of dropping point of lubricating grease - Automatic apparatus method*; Energy Institute, 01-01-2017.
- [11] Protokoll zur Sitzung des NAK 51810 „Prüfung der rheologischen Eigenschaften von Schmierfetten“ im NA062 am 16.4.2021; Tagesordnungspunkt 8 Klebrigkeit / Tackiness von Schmierstoffen.
- [12] E.P. Georgiou; D. Drees; M. De Bilde; M. Anderson, M. Carlstedt; O. Mollenhauer: *Quantification of Tackiness of a Grease: The Road to a Method*; Lubricants 9 (2021), März, Nr. 3, 32.
- [13] DIN ISO 6743-99: Schmierstoffe, Industrieöle und verwandte Erzeugnisse (Klasse L) - Klassifikation. Berlin: Beuth-Verlag, 2012.
- [14] DIN 51810-2:2017-04: *Prüfung von Schmierstoffen - Prüfung der rheologischen Eigenschaften von Schmierfetten - Teil 2: Bestimmung der Fließgrenze mit dem Oszillationsrheometer und dem Messsystem Platte/Platte*.
- [15] S. Achanta; M. Jungk; D. Drees: *Characterisation of cohesion, adhesion, and tackiness of lubricating greases using approach–retraction experiments*; Tribology International; 44 (10), 1127–1133, 2011.
- [16] ASTM D2979-16: *Standard Test Methode for Pressure-Sensitive Tack of Adhesives Using an Inverted Probe Machine (withdrawn 2019)*; ASTM International, West Conshohocken, PA 2016.
- [17] A. Aikin: *The problem with judging tackiness*; TLT Grease March 2020, p 34–36.
- [18] E. P. Georgiou, D. Drees, M. De Bilde, M. Anderson; *Quantitative approach to measuring the adhesion and tackiness of industrial greases*; Tribologie und Schmierungstechnik 66 (2019) 3.
- [19] Homepage der Fa. Falex Corporation: *Tackiness Adhesion Analyser*; <https://www.falex.com/product/taa/> (aufgerufen 10.2021).
- [20] K. O. Zeger; *Bestimmung der Klebrigkeit von Schmierfetten*; Masterarbeit an der Technischen Hochschule Nürnberg; Fak. Angewandte Chemie; 2021.
- [21] O. Tarhan; *Bestimmung der Klebrigkeit von Schmierfetten, Teil 1 und 2*; Masterprojekt an der Technischen Hochschule Nürnberg; Fak. Angewandte Chemie; 2021.



© Silas Leidel, Christiane Dettelbacher

Entwicklung eines KI-basierten EMS zur bidirektionalen Lastflexibilisierung von E-Fahrzeugflotten

Prof. Dr. Günter Kießling

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Das übergeordnete Ziel im Antrag der Vorlaufforschung war es, bis zum 31. Juli 2021 eine Arbeitsplanung für zwei konkrete Arbeitspakete eines Forschungsantrages im Bereich Gebäudeintegration von E-Mobilität zu entwickeln.

Zur verbesserten Integration von Elektroautos in das Energiemanagementsystem (EMS) von Gebäuden, sollen verschiedene KI-basierte Ladealgorithmen für Elektroautos (EV) entwickelt werden. Dabei soll insbesondere die zukünftig bidirektionale Lade- und Entlademöglichkeit der E-Autos nach ISO 15118 ausgenutzt werden. Langfristig soll im Rahmen eines Forschungsprojektes ein technisch funktionsfähiger Prototyp entwickelt werden, mit dem durch das gezielte Laden und Entladen des Akkus im E-Auto der Hausbewohner und/oder der Netzbetreiber den Netzbezug senken und positiv Einfluss auf die Belastung der Betriebsmittel im Verteilnetz nehmen können.

Während der Projektbearbeitung ergaben sich neue Erkenntnisse, die auch die Projektziele in der Gewichtung verändert haben. Da von den aktuell zugelassenen E-Autos nur die wenigsten Modelle ein bidirektionales Laden/Entladen unterstützen, bekam dieser Aspekt eine reduzierte Priorität. Stärker in den Fokus gerückt ist dagegen die positive Einflussnahme auf die Belastung im Verteilnetz beim Laden. Während der Projektbearbeitung wurde auch deutlich, dass die bei realen Fahrzeugen und Wallboxen tatsächlich nutzbaren Funktionen auf den angepeilten Prototypen deutlich limitierend wirken und auch eine erhebliche Komplexität mit sich bringen.

1. Projektdaten

Fördersumme	34.963 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Energie Campus Nürnberg
Projektleitung	Prof. Dr. Günter Kießling
Kontaktdaten	guenter.kiessling@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Gebäude im zukünftigen Stromnetz“ unter Leitung von Professor Kießling erforscht am Energiecampus Nürnberg verschiedene Forschungsthemen im Bereich der elektrischen Energietechnik, elektrischen Anlagen und Netze. Die Forschungsthemen umfassen

- aktive Fassade mit organischer Fotovoltaik,
- net zero energy buildings (nZEB),
- Verteilnetze für Nieder- und Mittelspannung,
- Klein-Windkraftanlagen und Windmesstechnik,
- Batterieanwendungen in Gebäuden (Li-ION, Pb-AGM, Redoxflow).
- DC Microgrid mit 10-kW-Windanlage, 10kW/100kWh-Batterie und 17-kW-PV-Anlage.

In das vorliegende Projekt fließen Vorarbeiten aus dem Projekt Herzo Base (FKZ: 02E2-3S6341) und seinem Folgeprojekt Herzo Opt (FKZ: 03ET1641A), beide gefördert durch das BMWi, ein. In den Projekten HerzoBase und HerzoOpt wurde bzw. wird ein Energiemanagementsystem in einem Wohngebäudebereich (Reihenhauskomplex im Plusenergiestandard mit acht Wohnparteien) implementiert und optimiert. Es wird das Zusammenspiel von Energieerzeugern (PV-Anlage) und -verbrauchern sowie der Energiespeicherung (Batteriespeicher), Wärmepumpe und Elektroauto untersucht. Jede der Anlagen ist mit einem separaten Stromzähler versehen. In den bewohnten Gebäuden sind bereits Dateninfrastruktur, 850 Messstellen und Sensoren (insbesondere im Bereich Strom- und Wärmeverbrauch, Energiespeicherung und Elektromobilität) verbaut. Die Lastdaten liegen im Viertelstundentakt vor. Die Wärmepumpen sowie Be- und Entladung von dem Batteriespeicher werden abhängig von der PV-Stromerzeugung gesteuert. Zwei der Haushalte besitzen bereits Elektro- bzw. Hybrid-Autos, die über die Steckdose im Carport geladen werden können. Der Stromverbrauch der Ladevorgänge wird seit Januar 2021 auch im Stromverbrauchs-Monitoring separat erfasst.

Durch Fördermaßnahmen, den Spritpreis und das Umweltbewusstsein haben die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen im Jahr 2021 stark zugenommen. Im Nachgang hierzu findet auch ein KfW-geförderter Ausbau von Lademöglichkeiten auf privaten (und öffentlichen) Stellplätzen statt. Die von den KfW-Förderbedingungen vorgegebene hohe Ladeleistung der Wallboxen von mindestens 11 kW führt dazu, dass der Stromanschluss des Gebäudes und auch das Strom-Verteilnetz ohne steuernde Maßnahmen schon durch wenige Wallboxen pro Wohnanlage in Summe sehr stark belastet würden.

In den Eigentümer-Gemeinschaften vieler Wohnanlagen sind der Einbau von Ladepunkten in der Tiefgarage, die notwendige Verstärkung des Hausanschlusses und der Einbau eines Leistungsmanagementsystems zur Vermeidung einer Überlastung des Hausanschlusses aktuelle Themen.

Auch die Betreiber der Verteilnetze arbeiten schon seit einiger Zeit an (zeitweisen) Begrenzungen der Leistung privater Ladepunkte. Diese Information hat sogar schon den Weg in die Boulevardpresse gefunden, wie z. B. *Focus online* am 2. Februar 2021 mit dem Titel berichtet: „Ab 2021 könnte Strom für Elektroautos rationiert werden: Stromnetzbetreiber aus Deutschland, Österreich, der Schweiz und Tschechien wollen ab 2021 den Ladestrom an privaten Ladestationen beschränken, damit es zu Spitzenzeiten nicht zur Überlastung der Verteilernetze kommt. Das teilten die Stromverbände aus Österreich und der Schweiz auf dem Elektromobilitätskongress der Fachzeitschrift ATZ in Mannheim mit.“

Somit ist die Steuerung der Ladeleistung von privaten Ladestationen sowohl für die Hausbewohner als auch für den Betreiber des Verteilnetzes ein hochaktuelles Thema.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das übergeordnete Ziel der Vorlaufforschung ist es, bis zum 31. Juli 2021 eine Arbeitsplanung für zwei konkrete Arbeitspakete eines Forschungsantrages im Bereich Gebäudeintegration von E-Mobilität zu entwickeln.

Zur verbesserten Integration von Elektroautos in das Energiemanagementsystem (EMS) von Gebäuden, sollen verschiedene KI-basierte Ladealgorithmen für Elektroautos (EV) entwickelt werden. Dabei soll insbesondere die zukünftig bidirektionale Lade- und Entlademöglichkeit der E-Autos nach ISO 15118 ausgenutzt werden. Langfristig soll im Rahmen eines Forschungsprojektes ein technisch funktionsfähiger Prototyp entwickelt werden, mit dem durch das gezielte Laden und Entladen des Akkus im E-Auto der Hausbewohner seinen Netzbezug senken und/oder der Netzbetreiber positiv Einfluss auf die Belastung der Betriebsmittel im Verteilnetz nehmen können. Abbildung 1 zeigt die Vorteile der Nutzer und der Netzbetreiber.



Abb. 1: Vorteile für Nutzer und Energieversorger am geplanten Forschungsvorhaben (Bild: Christian Bauer)

Der Hauptvorteil des bidirektionalen Ladens ist die vereinfachte Integration von stark fluktuierenden und schwer prognostizierbaren erneuerbaren Energiequellen wie Fotovoltaik oder Windkraftanlagen in das Verteilernetz, wodurch Netzspannung, -verlässlichkeit und die Belastung der Betriebsmittel verbessert werden. Auch die Effizienz des Ladevorgangs kann damit günstig beeinflusst und um mehrere Prozent gesteigert werden. Damit auch die Nutzer von der bidirektionalen Technologie profitieren, wird garantiert, dass deren Eigenstromanteil aus dem Ertrag der hauseigenen PV-Anlage maximiert wird.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um die vielen, teilweise tief verborgenen zu lösenden Probleme auf dem Weg zu einem funktionierenden Prototypen zu erfassen, wurde dieser in mehreren Konkretisierungsstufen aufgebaut:

1. Stufe als reine Simulation (jedes Gerät wird als interagierender Raspberry PI simuliert, Abbildung 2)

Im Gegensatz zum Antrag ergab sich eine Vielfalt an notwendigen Kommunikationsvarianten mit den verschiedenen Ladestationstypen, realisiert wurde für die Ziel-Ladestation dann OCPP 1.6 (statt 2.0).

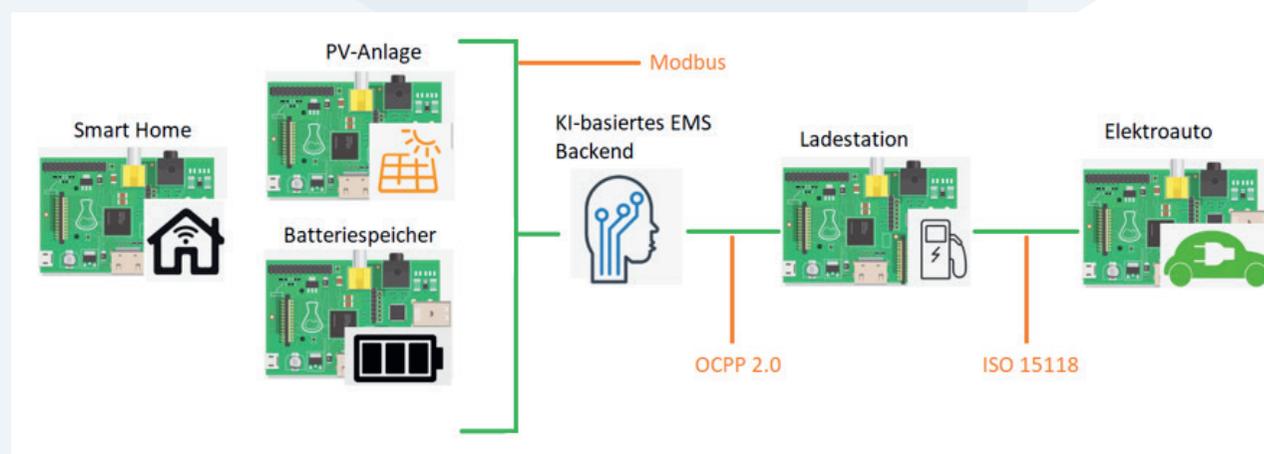


Abb. 2: Versuchsaufbau des Lademanagementsystems, wobei jedes Gerät durch einen Raspberry PI simuliert wird (Bild: Christian Bauer)

2. Stufe mit dem tatsächlichen Controller der EFR-Ladestation und der Bedienelektronik (Abbildung 3)

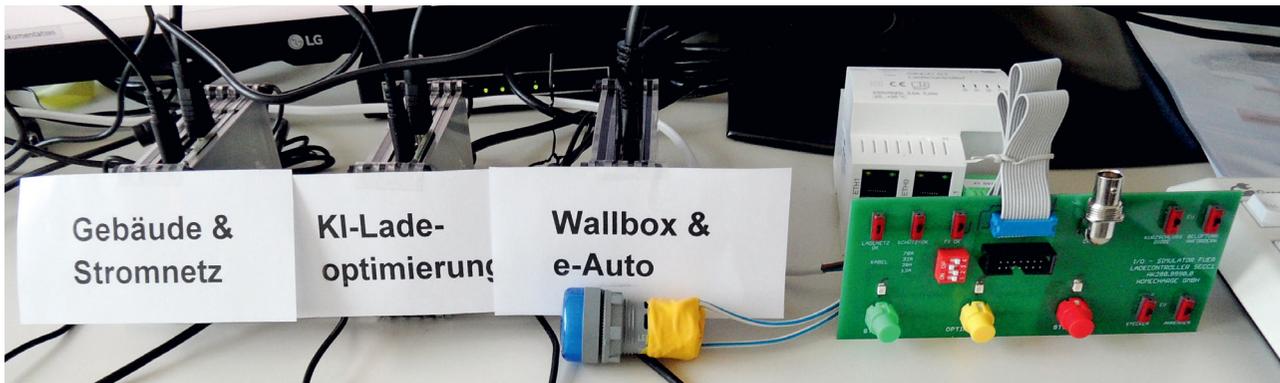


Abb. 3: Versuchsaufbau mit Raspberry Pi und Ladecontroller von EFR (Bild: Günter Kießling)

3. Stufe als Laboraufbau mit der vollständigen EFR-Ladestation und der für den Praxistest in HerzoBase vorgesehenen Elektronik (Backend für Netzlastprognose und Lastflussrechnung)



Abb. 4: Versuchsaufbau für die Entwicklung und Testen der Ladesteuerung im Labor am EnCN (Bild: Silas Leidel, Christiane Dettelbacher)

Verschiedene Betriebsstrategien beim Laden

Die Betriebsstrategien der Ladestation wurden entwickelt und alle Betriebszustände wurden definiert. Die Betriebszustände und deren Ablauf werden in der Abbildung 5 grafisch dargestellt. Eines der Ziele hier war die Erhöhung des PV-Eigenverbrauches und dadurch des Autarkiegrades des Gebäudes, zum anderen die Steigerung des Wirkungsgrades durch die Optimierung des Ladevorganges. Die PV-Einspeisung wird kontinuierlich am Hausanschlusspunkt über den S0-Impulsausgang des Stromzählers Z-Netz gemessen. Wenn eine Einspeisung stattfindet, wird die Ladeleistung des in der Ladestation angeschlossenen elektrischen Autos so angepasst, dass die Einspeisung minimiert wird. Daher wird der PV-Überschuss für das Laden des E-Autos direkt benutzt. Wenn die Netzeinspeisung unter einen definierten Minimalwert sinkt, wird der Ladestrom wieder auf den Standardwert gesetzt.

Ein weiteres Ziel betrifft die Netzdienlichkeit der Anlage. Ein höherer Netzbezug im Verteilernetz führt abends oft zu Überlastungen, welche eine momentane Spannungssenkung verursachen, die vom Stufenschalter des Einspeistransformators direkt geregelt wird. Bei einer Messung der momentanen Spannung am Netzanschlusspunkt des Gebäudes ist die Erfassung eines solchen Spannungssprungs ein Hinweis auf eine Netzüberlastung. Des Weiteren können mithilfe von historischen Daten der Netzlast im Verteilernetz von HerzoWerke die Belastungsszenarien des Netzes prognostiziert werden. Daher wurde die Betriebsstrategie als Kombination dieser zwei Faktoren entwickelt. Ziel war die Anpassung der Ladeleistung, sodass das Netz entlastet wird. Die Strategie besteht aus den folgenden zwei Teilen:

- Die momentane Spannung wird dauerhaft am Netzanschlusspunkt gemessen. Bei Erkennen einer hohen Netzlast aus den Stufenschalter-Sprüngen wird die Ladeleistung entsprechend angepasst.
- Die Zeiten starker Netzbelastung werden mithilfe der entwickelten Prognosemodelle ermittelt. Wenn das Auto während dieser Zeiten an der Ladestation angeschlossen ist, wird die Ladeleistung so angepasst, dass in Hochlastzeiten des Netzes das Auto nur mit reduzierter Leistung geladen wird.

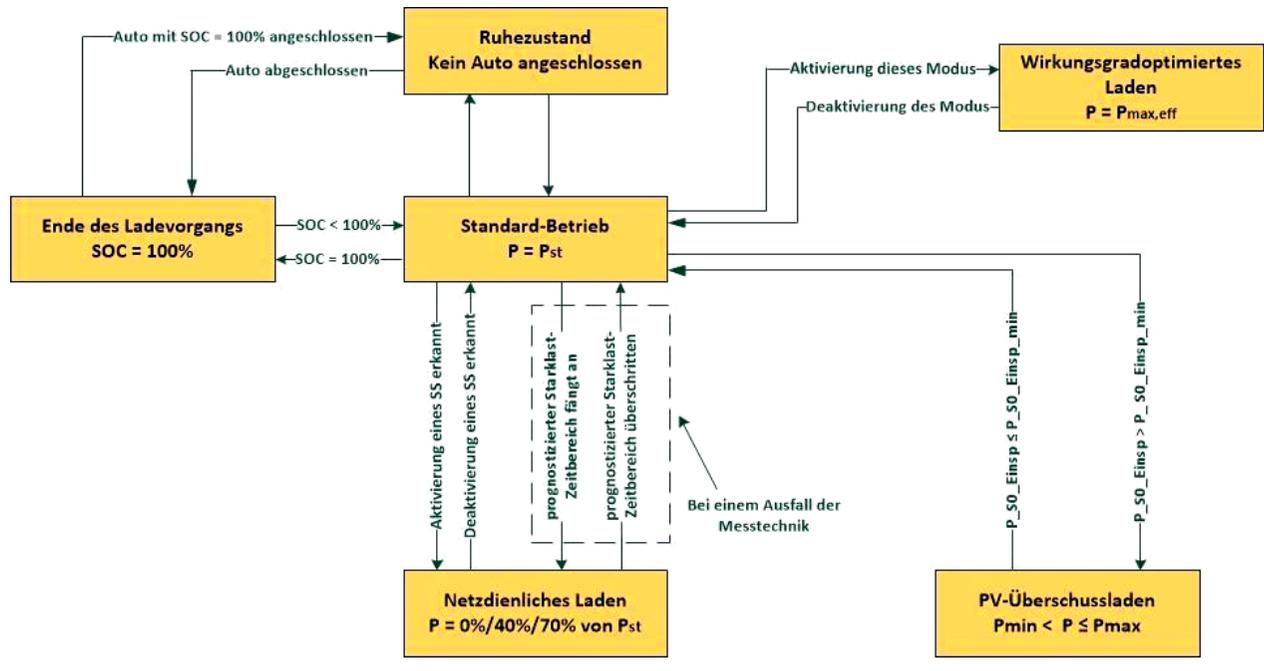


Abb. 5: Diagramm der Betriebszustände der Ladestation, wobei SOC: Ladezustand, P_{st} : Standardleistung, SS: Stufenschalter des Einspeisetransformators, $P_{max,eff}$: Ladeleistung am optimalen Betriebspunkt (Bild: Silas Leidel, Christiane Dettelbacher)

Als erste Versuchsobjekte zu intelligentem Laden können die Elektroautos in HerzoBase verwendet werden. Zwei der acht Haushalte besitzen mittlerweile Elektro- bzw. Hybrid-Autos. Diese werden derzeit zu Hause über die Steckdose im Carport geladen, für die jeweils ein separater Stromzähler installiert wurde. Seit dem 18. Januar 2021 liegen die Verbrauchsdaten dazu vor. Diese sind in Abbildung 7 für einen der Haushalte dargestellt.

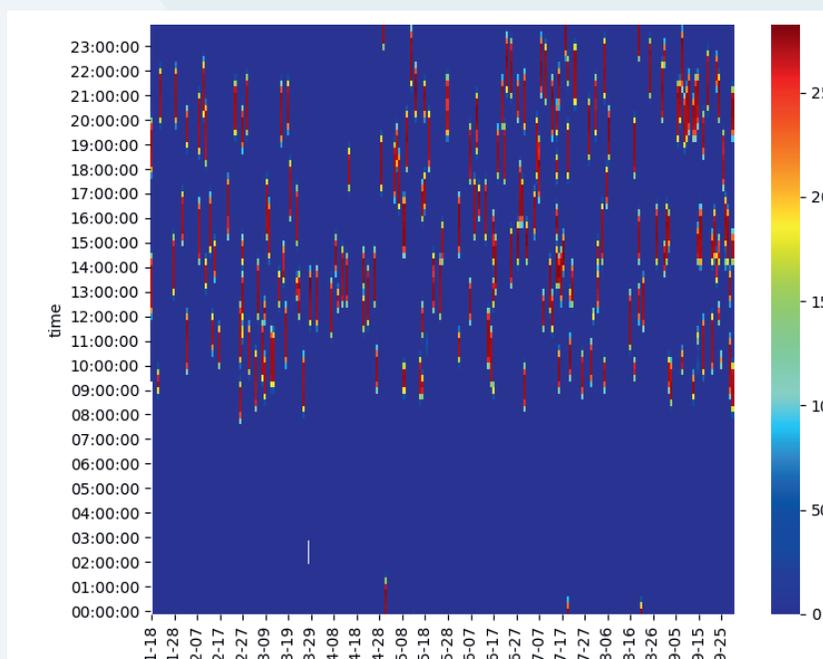


Abb. 6: Ladegewohnheiten eines Haushaltes in HerzoBase (Bild: Christiane Dettelbacher)

Das in Abbildung 7 dargestellte Ladeverhalten zeigt eine maximale Ladeleistung von 2,848 kW. Das entspricht der maximal möglichen Leistung, die für dieses Fahrzeug über Steckdose möglich ist. Das E-Auto wird vor allem in den Uhrzeiten zwischen 09:00 Uhr und 23:00 Uhr geladen. Bei zufälligem Ladestart in diesem Zeitraum beträgt die Ladedauer jeweils 2 Stunden, was einer Vollladung bei der Batteriekapazität des Plugin-Hybrids entspricht. Mithilfe intelligenter Ladetechnik könnten die Autoladungen vermehrt in die Zeiten zwischen 00:00 Uhr und 06:00 Uhr verschoben werden, was dem Netz sowie dem Lastmanagement des einzelnen Gebäudes dient. Dies ist aktuell Gegenstand unserer Forschung. Als Basis für intelligente Ladealgorithmen dienen Stromlastprognosen.

Für die Prognose der Netzlast im Versorgungsgebiet der HerzoWerke wurden verschiedene Prognosemethoden eingesetzt und verglichen. Dies dient als Basis der geplanten Betriebsstrategie für das netzdienliche Laden von E-Autos. Dabei wurden Künstliche Neuronale Netze (Multilayer-Perceptron und CNN-LSTM) sowie statistische Verfahren (SARIMA und Holt-Winters) eingesetzt. Das Holt-Winters-Verfahren wurde aufgrund der sehr hohen Genauigkeit in Kombination mit einer niedrigen Rechenzeit ausgewählt. Die Netzlast kann mithilfe der Holt-Winters-Methode mit einer Genauigkeit von 95 % für die nächsten 12 Stunden und mit einer Genauigkeit von 94 % für die nächsten 24 Stunden vorhergesagt werden. Die Abbildung 8 stellt die hohe Genauigkeit der Prognose gegenüber dem echten Messwert dar.

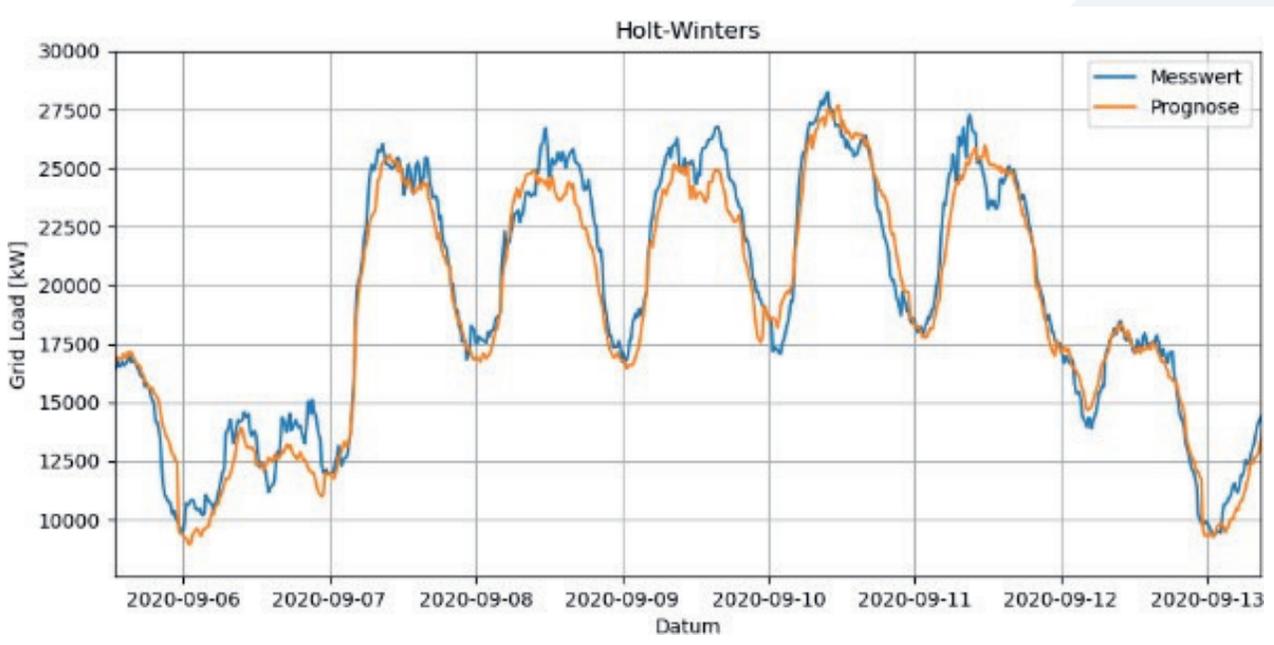


Abb. 7: Prognose der Netzlast (Gesamtlast im Versorgungsgebiet der HerzoWerke) mithilfe der Holt-Winters-Methode (Bild: Christiane Dettelbacher)

Somit erscheint es Erfolg versprechend, die Leistung der Ladestation so zu beeinflussen, dass in Hochlastzeiten des Netzes das Auto nur mit reduzierter Leistung geladen wird. Eine entsprechende Ladesteuerung ist im Labor am EnCN aufgebaut und getestet, demnächst erfolgt der Einbau in HerzoBase.

Für die Steuerung der Ladestation wurde ein Energiemanagementsystem (EMS), bestehend aus verschiedenen Teilnehmern, entwickelt. Ziel des Systems ist die Regelung der Ladestation. Dabei werden bestimmte Kriterien berücksichtigt, die von den unterschiedlichen Teilnehmern geliefert sowie verarbeitet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten beschrieben.

Zentrale Recheneinheit – Raspberry Pi 4

Das Zentrum des geplanten und teilrealisierten Systems ist der Raspberry Pi – in diesem Fall ein Modell 4 mit 8 GB RAM. Hier werden alle Daten der angeschlossenen Teilnehmer zusammengeführt und verarbeitet. Die bidirektionale Kommunikation zwischen Raspberry und Ladestation erfolgt auf Basis des offenen OCPP-1.6j-Protokolls, d. h. Kommunikation über Websocket und Paketaustausch mit JSON. Über einem WebSocket Cli-

ent werden JSON-Objekte mit den Ladeprofilen nach den Vorgaben des OCPP-1.6-Protokolls über die Ethernet-Kommunikationsschnittstelle an die Ladestation geschickt. Die Ladestation ist durch den Hersteller protokollfähig ausgeliefert worden. Für die Erstellung der Ladeprofile und die Integration der WebSocket-Funktionalität in dem OCPP wurden die Entwicklungsumgebung Anaconda und die Programmiersprache Python benutzt. Verschiedene Skripts wurden in Python entwickelt, welche den Ladecontroller der Ladestation adressieren und steuern. Zum Entwickeln und Testen des EMS und seiner Kommunikation wurde ein Versuchsaufbau im Labor des EnCN erstellt. Während der ersten Phase der Entwicklung wurde ein von der Partnerfirma EFR gelieferter Testaufbau eingesetzt. Der Testaufbau besteht aus dem Ladecontroller der Ladestation sowie Bedien- und Anzeigeelementen, mit welchen die Funktionen der Ladestation simuliert werden. Während der zweiten Phase wurde der Testaufbau mit der 22-kW-Ladestation Home:Charge HC22L-2100 der Fa. EFR ersetzt (Abbildung 4).



Abb. 8: Versuchsaufbau für die Entwicklung und Testen der Ladesteuerung im Labor am EnCN (Bild: Christiane Dettelbacher)

Regelungskonzept

Für die Regelung wird ein dreistufiges Konzept verfolgt. Als oberstes Ziel ist die effiziente Nutzung des verfügbaren PV-Stromes definiert. Das bedeutet, sobald es PV-Überschussstrom gibt, soll mit dem Überschussbetrag das EV über die Ladestation geladen werden. Ist kein PV-Überschuss verfügbar, aber es besteht trotzdem ein Ladeauftrag, wird auf ein Standardleistungsprofil mit einer Ladeleistungsbegrenzung von 4 kW zurückgegriffen. Die 4 kW ergeben sich aus der Tatsache, dass die meisten EVs mit Akkukapazitäten zwischen 40–50 kWh gebaut werden. Somit wird der Akku mit 10 h Ladung de facto vollgeladen. Dies entspricht der klassischen Nachtladezeit von 20 Uhr abends bis 6 Uhr morgens. Die dritte Stufe ist die Reduktion der Ladeleistung des Standardprofils bei einer Detektion von einem Spannungssprung nach oben im Netz, was einer hohen Netzbelastung gleichkommt. Hier wird die Ladeleistung auf 2 kW halbiert und das Netz weiterhin beobachtet. Sollte es zu einem weiteren Sprung nach oben kommen, wird die Ladeleistung nochmals halbiert. Das beschriebene Szenario tritt regelmäßig in den Abendstunden von 18 bis 20 Uhr in Wohnsiedlungen auf.

Messung des PV-Überschusses

Um die gerade zur Verfügung stehende PV-Überschuss zu messen, wird der S0-Ausgang des Stromzählers am Netzanschlusspunkt über den 1wire-USB-Master der Fa. SMS-Guard an den Raspberry geführt, der die S0-Impulse konvertiert und in eine Datenbank schreibt. Diese Datenbank kann dann vom Raspberry ausgelesen werden.

Spannungsmessung

Zur Ermittlung der Netzbelastung wurde eine Messeinrichtung entwickelt, welche die vom Einspeisetransformator verursachten Spannungssprünge messen kann. Diese besteht aus einem selbst entwickelten Board, welches über einen Spannungsteiler und einen 12-bit-A/D-Wandler die Spannung erfasst (Abbildung 10).

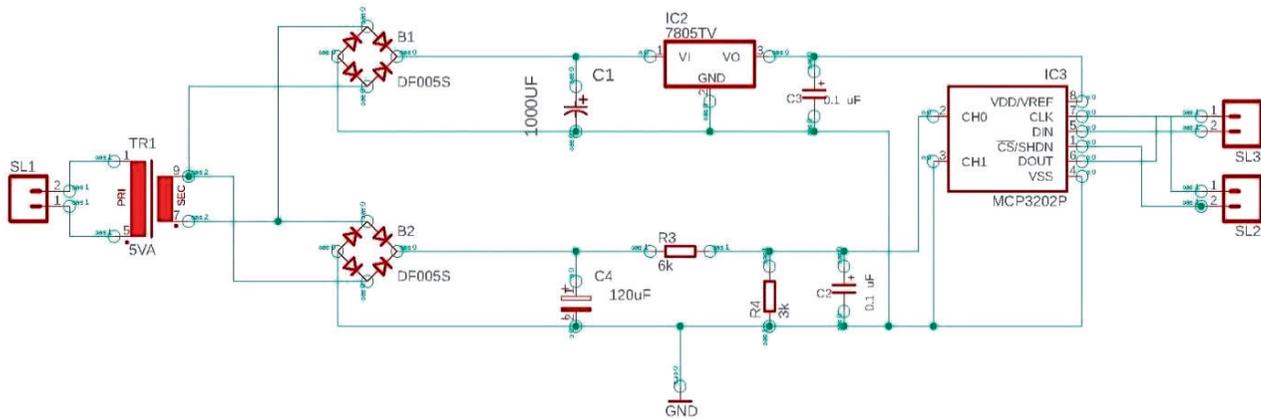


Abb. 9: Schaltplan der Messeinrichtung für die Messung der momentanen Spannung im Gebäude (Bild: Silas Leidel, Christiane Dettelbacher)

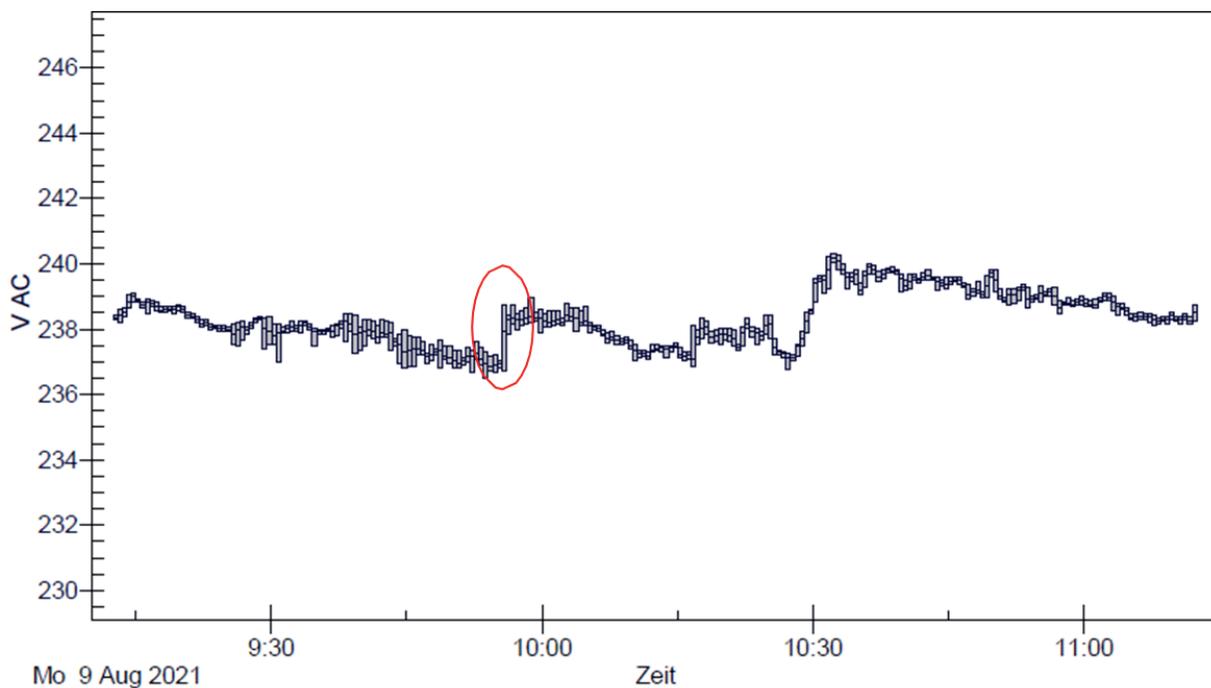


Abb. 10: Messung eines Spannungssprungs (Bild: Silas Leidel) 7: Prognose der Netzlast (Gesamtlast im Versorgungsgebiet der HerzoWerke) mithilfe der Holt-Winters-Methode (Bild: Christiane Dettelbacher)

Diese Spannungsmessung ist eher qualitativer Natur, da die Spannungssprünge im Netz, verursacht vom Einspeisetransformator, detektiert werden. Abbildung 11 zeigt die Messung eines solchen Spannungssprungs. Dabei wird das Board mit einem 230-V-Abgang verbunden. Dieser Abgang muss sich nicht zwingend direkt nach dem Messzähler befinden, sondern kann auch als einfacher Steckdosenanschluss ausgeführt werden. Nach dem Wandeln der 230 V auf 9 V durch einen Trenntransformator, wird die Spannung auf ca. 3,3 V geteilt. Diese Spannung wird zum A/D-Wandler gezogen, welcher einen Messbereich von 0–5 V hat. In diesem Messbereich löst der Wandler mit einer Genauigkeit von $5 \text{ V}/4096 = 1,2 \text{ mV}$ auf. Die 4096 ergeben sich aus der 12-bit-Auflösung. Die Übertragung der gemessenen Werte erfolgt dann über die SPI-Schnittstelle an das Raspberry Pi. Diese Schnittstelle ist synchron seriell definiert und wird durch ein Taktsignal des Raspberrys geführt.

Als 4. und letzte Stufe ist dann für die Erprobung in der Praxis der Einbau in HerzoBase geplant. Mit den Erkenntnissen daraus soll im Jahr 2022 ein Förderprojekt mit einer größeren Anwendung beantragt werden.

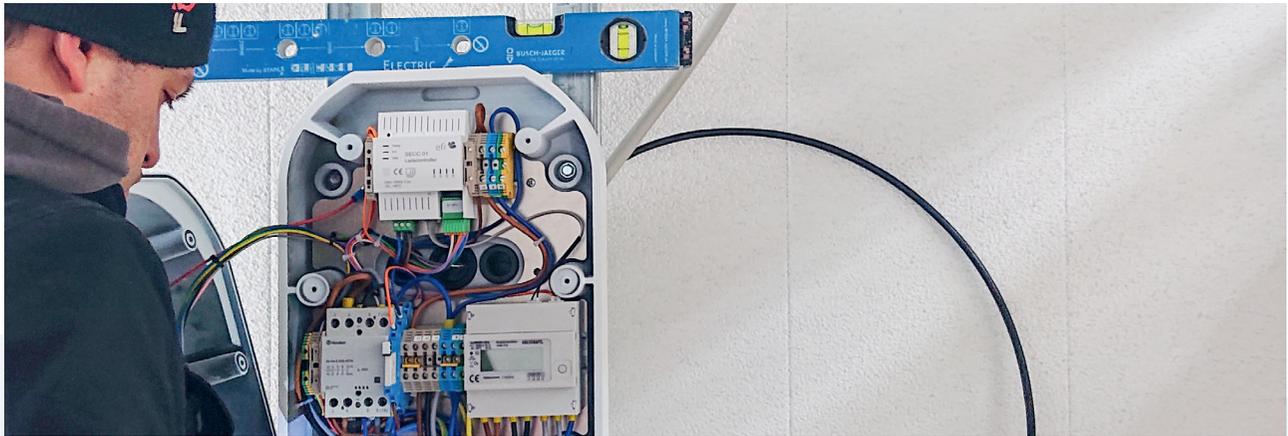


Abb. 11: Montage der Wallbox von EFR mit der THN-Ladesteuerung im Carport der Energiespeicherhäuser HerzoBase (Bild: Christiane Dettelbacher)

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen der Vorlauforschung wurde eine Projektskizze für ein größeres zu beantragendes Förderprojekt erarbeitet. Im Rahmen dieses Projektes soll auch das bidirektionale Laden thematisiert werden, jedoch soll der Fokus vor allem auf das PV-Überschussladen, das prognosebasierte Laden und vor allem auch auf das netzdienliche Laden gesetzt werden.

Untersuchungsobjekt des Projektes ist ein Fuhrpark mit Elektroautos. Anhand des Untersuchungsobjektes soll ein Energiemanagementsystem entwickelt werden, welches es ermöglicht, Belastungen auf Netz- und Gebäudeebene durch intelligente Ladealgorithmen auszugleichen. Ladezeiten und -leistungen sollen je nach Netzbelastung und der Last im Gebäude angepasst werden. Der Modus des netzdienlichen Ladens soll aktiviert werden, sobald ein Netzbezug am Hausanschlusspunkt gemessen wird. Findet kein Netzbezug statt, so soll der Modus des PV-Überschussladens aktiviert werden.

Es sollen drei Möglichkeiten für das netzdienliche Laden implementiert und getestet werden – mittels Hochlastzeitfenster/Niedriglastzeitfenster (von Netzbetreiber bekannt gegeben), mittels Messung der Spannungssprünge am Einspeisetransformator und mittels Lastprognose (statistische Methoden und Methoden Maschinellen Lernens) und daraus ableitbarer Kombinationen. Es sollen die Algorithmen für die Netzlastprognosen aus den vorherigen Projekten weiterentwickelt werden. Diese drei Möglichkeiten sollen implementiert und miteinander kombiniert angewandt werden. Um Anreize zu schaffen, zu Zeiten geringer Netzbelastung zu laden, soll in Zusammenarbeit mit dem Netzbetreiber ein Anreizsystem mit variablen Strompreisen entworfen werden.

Neben der Spitzenlastkappung im eigenen Gebäude soll auch die Bereitstellung von Regelenergie mit evtl. Blindleistungsmanagement (Spannungshaltung / Frequenzhaltung) untersucht werden.

Zudem soll ein Buchungssystem / GUI / App entwickelt werden, über die geplante Nutzungszeiten und Fahrtstrecken der Fahrzeuge eingegeben werden können. Es kann daraufhin eine Anpassung der Ladefahrpläne stattfinden. So ist es möglich, das Elektroauto mit erhöhter Leistung zu laden, auch wenn gerade kein PV-Überschuss zur Verfügung steht und das Netz stark belastet ist.

Sind im Fuhrpark mehrere Elektrofahrzeuge vorhanden, die gleichzeitig geladen werden sollen, so soll ein Summenlastmanagement greifen. Dazu wird die maximal über den Hausanschluss bereitgestellte Leistung angegeben. Es wird zudem kontinuierlich die bezogene Leistung am Hausanschlusspunkt gemessen (dynamisches Lastmanagement). Die übrige Leistung wird auf die zu ladenden Fahrzeuge aufgeteilt. Auf das Summenlastmanagement kann durch das Buchungssystem / die App Einfluss genommen werden. So kann ein Auto, welches möglichst bald für eine Fahrt bereitstehen muss, priorisiert und mit höherer Leistung geladen werden. Alle beschriebenen Algorithmen sollen, wenn Elektroauto und Ladestation dazu geeignet sind, auf bidirektionales Laden erweitert werden können.

Im Rahmen dieses Projektes soll ein Prototyp eines Energiemanagementsystems entwickelt werden, der mit verschiedenen Ladestationen kommunizieren kann. Ein Versuchsaufbau des Lademanagementsystems ist in Abbildung 12 dargestellt.

Versuchsaufbau

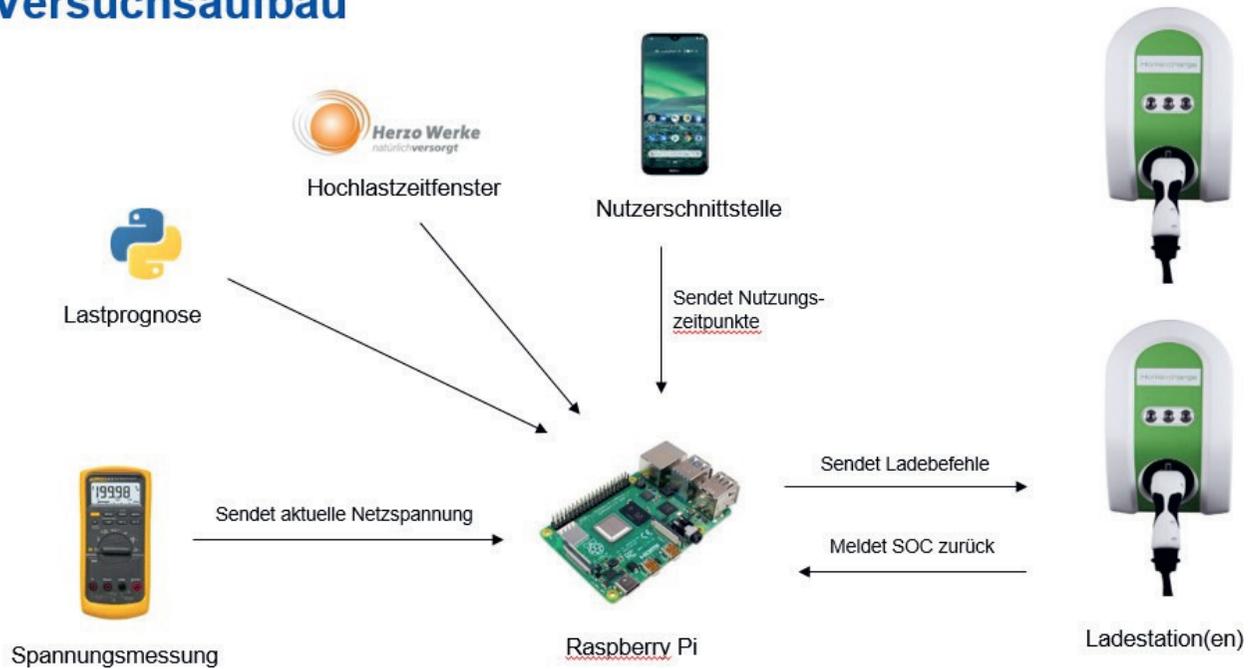


Abb. 12: Versuchsaufbau des geplanten Lademanagementsystems (Bild: Christiane Dettelbacher)

Es wurden dabei folgende Arbeitspakete (siehe Tabelle 1) erarbeitet, welche noch mit den zukünftigen Projektpartnern abgestimmt werden müssen. Die Arbeitspakete werden auch noch abhängig von dem Förderprogramm angepasst, unter dem die Skizze eingereicht wird.

AP		Beteiligt
1	Simulationsmodell - PV-Anlage, Gebäudeverbrauchsdaten, Netzdaten, E-Auto-Laden	
1.1	Recherche Stand der Technik und Festlegung von Untersuchungs- und Simulationsrahmen	THN
1.2	Netzzustand/-diagnose/-analyse (Stufenschalter)	THN Netzbetreiber / Energieversorger
1.3	Gebäudezustand/-verbrauch, E-Auto-Laden Zustand, PV-Anlage Zustand	Unternehmen mit E-Fuhrpark Automobilfirma THN
1.4	Simulationsmodell in MATLAB / Python – Zusammenhang der Energie-Verbraucher und -Erzeuger	THN
1.5	Festlegung geeigneter Simulationsparameter	THN
2	Versuchsaufbau mit Raspberry Pis (Kommunikationsprotokoll / OCPP)	
2.1	Versuchsaufbau hardwareseitig / Kommunikation zwischen Recheneinheiten	THN
2.2	Softwarebasierte Steuerung /Systemarchitektur entwickeln (Klären von Schnittstellen und Gateways), Simulation	Ladestationhersteller / Zulieferer Automobilindustrie THN
2.3	Implementierung des Simulationsmodells aus AP1	THN
3	Erstellung von Lade-Algorithmen	
3.1	Untersuchen der Rahmenbedingungen	THN
3.2	Prognosen erstellen (Netzlaster, Gebäudelaster, Ladelaster) – statistische Methoden / KI-Methoden	THN
3.3	Programmieren der Ladealgorithmen (PV-Überschussladen, netzdienliches Laden, Einflussmöglichkeiten über App, Flottenlastmanagement)	THN
3.4	Verknüpfung mit Energieerzeugern und -verbrauchern auf dem Gelände	THN
3.5	Implementieren der Ladealgorithmen in Versuchsaufbau (Raspis)	THN
4	Erstellung App / Buchungssystem (Buchung von Fahrten)	
4.1	Bisheriges Buchungssystem als Basis zur Verfügung stellen & Weiterentwicklung Buchungssystem	Unternehmen mit E-Fuhrpark
5	Entwicklung eines Demonstrators	
5.1	Gehäuse mit Anschlüssen etc. entwerfen / Hardware / Leistungselektronik	Ladestation-Hersteller / Zulieferer Automobilindustrie
5.2	Entwicklung GUI	THN Unternehmen mit E-Fuhrpark
5.3	Beratende Tätigkeit	Automobilfirma Unternehmen mit E-Fuhrpark Netzbetreiber / Energieversorger
6	Implementierung/Anwendung in Fuhrpark von Projektpartner*innen	
6.1	Nachrüsten von Fuhrpark mit notwendigen Zählern / Daten-Infrastruktur / Flottenmonitoring	Unternehmen mit E-Fuhrpark
6.2	Anwendung Aufbau mit Raspberry Pis im Fuhrpark	THN
6.3	Anwendung des Demonstrators im Fuhrpark	Unternehmen mit E-Fuhrpark THN

Tab. 1: Arbeitspakete des geplanten Projekts

Derzeit läuft die Akquise der Projektpartner*innen. Die Zeitplanung sowie die Aufwendung in Personenmonaten werden mit den zukünftigen Projektpartner*innen und in Abhängigkeit davon bestimmt, unter welchem Förderprogramm die Projektskizze eingereicht wird.

Es ist geplant, die Projektskizze nach ersten Vorklärlungen bei einem der folgenden Förderprogramme einzureichen:

- Energieforschungsprogramm – Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung – Punkt 3.3.1.b (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi) – Förderprogramm läuft bis 30.06.2024 – Skizzeneinreichung jederzeit möglich – https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-forschungsfoerderung-im-7-energieforschungsprogramm.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- Modernitätsfonds (mFUND) • Förderlinie 1: Ausarbeitung von Projektvorschlägen/Vorstudien (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur - BMVI) – Skizzeneinreichung bis zum 31.01.2022 jederzeit möglich – https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/foerderrichtlinie-mfund.pdf?__blob=publicationFile
- Richtlinie zu einer gemeinsamen Förderinitiative zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität – Punkt 2.3 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) – für die jeweilige Förderrunde können die Projektskizzen bis 30.04 des Jahres eingereicht werden – die Laufzeit des Förderprogrammes ist bis zum 30.06.2024 befristet – https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/F/foerderrichtlinie-elektromobilitaet.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Förderrichtlinie Elektromobilität – Punkt 2.3 (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur - BMVI) – die Laufzeit des Förderprogrammes ist bis zum 30.06.2024 befristet – der Antragsteller wird im Rahmen von separaten Aufrufen zur Einreichung von Projektskizzen zum jeweiligen Stichtag aufgefordert – https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/foerderrichtlinie-elektromobilitaet-12-2020.pdf?__blob=publicationFile
- ZIM-Förderung (derzeit ausgesetzt – eventuell zu späterem Zeitpunkt wieder möglich)
- Bayerische Forschungstiftung – das Förderprogramm läuft bis 30.06.2024 – Antragstellung jederzeit möglich – <https://forschungstiftung.de/Antragstellung/Foerderrichtlinien.html>

Wegen der zum Teil unerwarteten Probleme beim Test der Machbarkeit des Prototypen wurde der ursprünglich angepeilte Termin Oktober 2021 für die Antragstellung eines Forschungsprojektes nicht erreicht.

Machbarkeitsstudie zur Herstellung formstabiler Zeolith-Hohlprofilkörper aus Geopolymeren durch Hydrothermal-Synthese

Prof. Dr. Wolfgang Krcmar

M. Eng. Daniela Sappa

M. Eng. Felix Kugler

M. Eng. Jan Sebastian Hildebrand

B. Eng. Maximilian Kuschmierz

Fakultät Werkstofftechnik / Energie Campus Nürnberg

Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Im Zuge der Energiewende in Deutschland soll die Energieerzeugung zukünftig zu großen Teilen durch erneuerbare Energien erfolgen, um schlussendlich fossile Energieträger zu schonen und die Atomkraft vollständig zu ersetzen. Allerdings zeichnen sich die erneuerbaren Energien durch eine starke tageszeitliche und auch saisonale Volatilität in Bezug auf die Energieerzeugung aus. Die zeitlichen Phasen der Stromerzeugung aus Windkraft und Fotovoltaik sind abhängig von Wetter- und Umwelteinflüssen. Da das Leistungsangebot von diesen äußeren Umständen abhängt, kann die Leistungsnachfrage zeitlich nicht optimal bedient werden. Dadurch besteht ein erhöhter Bedarf an der Entwicklung effizienter Speichermethoden, die, in Phasen erhöhter Erzeugung, die Energie verlässlich über längere Zeiträume speichern und bei Bedarf wieder abgeben können. Thermische Energiespeicher-Systeme bzw. Wärmespeicher sind geeignet, um die Diskrepanz zwischen Leistungsangebot und Leistungsnachfrage auszugleichen. Ein Großteil des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Prozess- und Raumwärme. Dieser Anteil entspricht über 50 % über alle Sektoren in Deutschland, bezogen auf die Haushalte sogar über 80 %.

Eine sehr effektive Form eines Wärmespeichers stellt der sogenannte Sorptionswärmespeicher dar, der neben „sensibler Wärme“ auch „latente Wärme“ in Form von Verdampfungsenthalpie ein- und ausspeichern kann. Beim Einsatz in Sorptionswärmespeichern bieten Zeolithe eine hohe Speicherdichte bei nahezu verlustfreier Langzeitspeicherung und damit eine Entkopplung von Ladeleistung und Speicherkapazität, bei gleichzeitiger Einsatzfähigkeit über einen breiten Temperaturbereich. Darüber hinaus sind Zeolithe nicht giftig, unbedenklich für die Umwelt und nicht brennbar. Es kann angenommen werden, dass zeolithische Hohlkörper mit maßgeschneiderten Eigenschaften gegenüber herkömmlich genutzten Warmwasserspeichern ein beachtliches Potenzial für den Einsatz als Sorptionswärmespeicher besitzen. Heutzutage kommen für diese Zwecke meist pulverförmige Zeolithe in Festbettschüttungen zum Einsatz, die jedoch in ihrer Raumerfüllung beschränkt sind und zu beträchtlichen Druckverlusten beim Durchströmen führen. Es kann angenommen werden, dass Hohlkörperprofile hierfür ein erhöhtes Potenzial zur Steigerung der Raumerfüllung bei geringerem Druckverlust und damit eine vergleichsweise bessere Effizienz ermöglichen. Während die maximal erreichbare Raumerfüllung bei der Verwendung von Festbettschüttungen auf 74 Vol.-% beschränkt ist, erreichen die besten Hohlkörperprofile eine Raumerfüllung von nahezu 95 Vol. %.

Das Ziel des hier vorgestellten Projektes aus der THN-Vorlauf-forschung besteht darin, aus unterschiedlichen Geopolymer-Typen als Ausgangsmaterialien, mittels Hydrothermal-Synthese formstabile Zeolith-Körper und im besten Falle Hohlkörper-Profile herzustellen sowie den zugrunde liegenden Chemismus zu charakterisieren und zu analysieren. Zu diesem Zweck wird eine Parameterstudie zur Herstellung geeigneter Zeolithe durchgeführt, in der die Parameter Zeit, Temperatur und Laugenkonzentration c_{NaOH} jeweils in vier Stufen variiert werden. Bei den Ausgangsmaterialien zur Herstellung der Geopolymere, aus denen im Folgeschritt

durch Hydrothermal-Synthese Zeolithe gewonnen werden, sollen vor allem recycelbare Rohstoffe zum Einsatz kommen. Als Hauptbestandteile zur Herstellung der Geopolymere werden die wiederverwertbaren Materialien Flugasche, gemahlener Bauschutt und gemahlener Ziegelbruch verwendet. Die Geopolymer- sowie die Hydrothermal-Synthese sollen ohne die Verwendung von Bindemitteln jeglicher Form erfolgen und aufzeigen, dass sich auf diese Weise Zeolithe sowohl kostengünstig als auch apparativ einfach herstellen lassen. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der so hergestellten Zeolithe beschränkt sich auf die Überprüfung der Formstabilität nach der Hydrothermal-Synthese, da dieser Reaktionsschritt entscheidend für die Eignung des Zeoliths mit Hohlkörper-Struktur ist. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wird auf den Einfluss der Verfahrensparameter Zeit, Temperatur und Konzentration der Natronlauge cNaOH gelegt. Die hergestellten Zeolith-Proben werden nach der Hydrothermal-Synthese aufgemahlen und mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) auf das Ausmaß der Zeolith-Bildungen analysiert. Dabei sollen die entstehenden Zeolith-Typen charakterisiert und ihr Vorhandensein in Zusammenhang mit den verwendeten Versuchsparametern gebracht werden. Im Verlauf der Studie werden die besten Parametervariationen aus den gewonnenen Daten ermittelt. Als günstig werden ein hoher Umsetzungsgrad relevanter Zeolithe sowie eine hohe Formstabilität angesehen.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe „Energieeffiziente Werkstoffe“ / EnCN
Projektleitung	Prof. Dr. Wolfgang Krcmar M. Eng. Daniela Sappa; M. Eng. Felix Kugler; M. Eng. Jan Sebastian Hildebrand B. Eng. Maximilian Kuschmierz
Kontaktdaten	wolfgang.krcmar@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der Einsatz von Zeolithen in Festbettschüttungen und Wirbelschichten führt zu einem deutlichen Druckverlust des durchströmenden Fluids. Dieses Fluid kann dabei zum konvektiven Wärmetransport, als Trägerfluid für Reaktanten oder selbst als Reaktant dienen. Bei Zeolith-Granulat-Schüttungen ist bei einheitlichen Kugeldurchmessern zudem die Raumaufüllung auf die dichteste Kugelpackung mit 74 Vol.-% begrenzt. Bei geeigneten Mischungen unterschiedlicher Kugeldurchmesser kann die Raumaufüllung zwar verbessert werden, eine Verdichtung und eine weitere Erhöhung des Druckverlustes sind jedoch die Folge. Aus diesem Grund werden Zeolith-Körper mit einer Hohlraumgeometrie (z. B. Wabenkörper, Mehrkanalrohre) angestrebt, die beim Durchströmen einen geringeren Druckverlust aufweisen und eine Raumaufüllung von bis zu 95 Vol.-% ermöglichen [1]. Um das Ziel zu erreichen, werden in der Industrie verschiedene Ansätze verfolgt [2]:

- Zeolithbeschichtete Monolithe
- Bindemittelbasierte Zeolith-Körper
- Bindemittelfreie Zeolith-Körper

Um Monolithe mit Zeolithen zu beschichten, wird natürliches oder synthetisches monolithisches Ausgangsmaterial wie Schulp oder Cordierit, welche die äußere Form vorgeben, durch unterschiedliche Beschichtungsverfahren wie z. B. In-situ-Dipcoating mit einer Zeolith-Schicht im ein- bis dreistelligen Mikrometerbereich ausgerüstet [2; 3]. Zur Herstellung bindemittelbasierter Zeolith-Körper werden Zeolith-Granulate mit mineralischen oder organischen Bindemitteln und optional mit Weichmachern gemischt und durch Formgebungsprozesse wie z. B. Extrusion in die gewünschte Geometrie gebracht und je nach Verfahren thermisch nachbehandelt [2; 4].

Bindemittelfreie Zeolith-Körper werden durch Formgebungsverfahren wie Gießen oder Extrudieren unter Einsatz temporärer Bindemittel wie z. B. Kaolinit in die gewünschte Geometrie gebracht. Das temporäre Bindemittel wird in einem nachfolgenden Schritt thermisch durch Dehydratisierung aktiviert, wobei es sich zu Metakaolin umwandelt. Im Anschluss wird der Metakaolin nasschemisch zu kristallinen Zeolithen umgewandelt [1]. Die zeolithbeschichteten Monolithe haben den Nachteil eines nur geringen Zeolith-Anteils. Auch darf der Monolith, der beschichtet wird, keinen Einfluss auf die angestrebte chemische Reaktion ausüben und muss den Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck, pH-Wert etc.) standhalten. Die größte Einschränkung bei bindemittelbasierten Zeolith-Körpern ist die thermische Stabilität, besonders beim Einsatz von Polymeren als Binder. Geringere Beschränkungen bzgl. der Anwendungsparameter als bei zeolithbeschichteten Monolithen weisen bindemittelbasierte und bindemittelfreie Zeolith-Körper auf; allerdings gibt es einige Nachteile bei der Herstellung dieser Körper. Um homogene Proben zu erhalten, darf der Zeolith-Granulat-Bindemittel-Schlicker beim Formgebungsverfahren keine Sedimentation erfahren. Wird die Formgebung durch Extrusion herbeigeführt, müssen rheologische Eigenschaften wie Plastizität und Viskosität in für das Verfahren geeigneter Weise eingestellt werden. Dazu können Additive notwendig sein, die den Preis des Produktes erhöhen. Ebenfalls werden fertige Zeolith-Granulate als Ausgangsmaterial eingesetzt, was im Gegensatz zu einer Umwandlung von Recycling-Materialien, wie z. B. Flugaschen zu Zeolithen durch Hydrothermal-Synthese, zu vergleichsweise höheren Kosten führt. Die hier untersuchte Synthese-Route zur Herstellung monolithischer Zeolith-Körper muss auf keinerlei zusätzliche Bindemittel, so-wohl dauerhafte als auch temporäre, zur Formgebung der Zeolith-Geometrie zurückgreifen. Das hat gegenüber den dauerhaften, bindemittelbasierten Formkörpern eine erhebliche Erweiterung der möglichen Betriebstemperaturen zur Folge, sodass in der katalytischen Anwendung ein deutlich breiteres Spektrum an Reaktionen durchführbar ist und sich in der Anwendung als Sorptionsspeicher ein größerer, von der Temperaturdifferenz abhängiger, „sensibler Wärmeanteil“ ein- und ausspeichern lässt. Im Vergleich zu den bindemittelfreien Hohlraum-Geometrien, die mit einem temporären Bindemittel zur Formgebung versehen werden, bietet das hier betrachtete Vorgehen den Vorteil, dass keine Anpassung der rheologischen Eigenschaften des Schlickers hinsichtlich des Formgebungsverfahrens durchgeführt werden muss, um z. B. beim Gießen ein Sedimentieren des Zeolith-Granulats zu verhindern oder die erforderliche Plastizität für ein Extrusionsverfahren einzustellen. Es ist möglich, durch Hydrothermal-Synthese aus Geopolymeren Zeolithe zu synthetisieren. Die Geopolymere wurden insbesondere von dem französischen Forscher Prof. Dr. Joseph Davidovits synthetisiert und beschrieben. Er zeigte, dass sich in Analogie zur Herstellung organischer Polymere auch anorganische Minerale durch Prozesse wie die Polykondensation in Polymere umwandeln lassen. Der Name Geopolymere bezieht sich darauf, dass sich die Ausgangsmaterialien für die Synthese, wie z.B. Kaolin und Tone zumeist direkt in der Natur finden lassen und deren Syntheseprodukte Verkettungen und Vernetzungen zeigen, die in ihrer Struktur Polymeren auf Kohlenwasserstoffbasis ähneln. Für die Geopolymerherstellung eignen sich aber auch Reststoffe wie Flugaschen, Ziegelmehl sowie gemahlener Misch- und Betonbauschutt.

Heute werden Geopolymere als amorphe bis teilkristalline, alkalisch aktivierte Aluminiumsilikate definiert. Die Synthese erfolgt zumeist über Polykondensation, entweder im alkalischen Medium (mit Na⁺, K⁺, Ca²⁺, etc.) oder seltener im saueren Medium (mit z. B. Phosphorsäure, Huminsäuren etc.). Der genaue Mechanismus der Umwandlung von Geopolymeren zu Zeolithen mittels Hydrothermal-Synthese ist noch nicht vollständig aufgeklärt. Nach heutigem Stand der Technik ist nur die Synthese bestimmter Zeolith-Typen (z. B. Faujasit, P1, NaA) möglich

[5–7]. Dadurch kann eine optimale Anpassung des Zeolith-Typs auf die gewünschte Anwendung nicht erreicht werden, was ein Nachteil im Vergleich zu den etablierten Herstellungsmethoden sein kann. Möglicherweise ergeben sich jedoch durch den Einsatz alternativer Ausgangsmaterialien weitere Zeolith-Typen als Synthese-Produkte. Die Hydrothermal-Synthese stellt die bisher beste Methode zur Synthese von Zeolithen dar [7]. Im Allgemeinen wird unter der Hydrothermal-Synthese die Gewinnung kristalliner Substanzen aus wässrigen Lösungen im überkritischen Zustand verstanden. Dabei wird ausgenutzt, dass Wasser im überkritischen Zustand ($T_{\text{krit.}} = 647$ K, $p_{\text{krit.}} = 22,060$ MPa) für viele Substanzen ein weitaus besseres Lösungsvermögen aufweist. Die Pionierarbeiten zur Anwendung dieser Synthese für die Zeolith-Gewinnung stammen von Barrer und Milton [8]. So konnte Milton durch die Verwendung von Alumosilikat-Gelen synthetische Zeolithe mit großen Porenöffnungen herstellen.

Für die Zeolith-Synthese notwendige Edukte lassen sich in fünf verschiedene Typen-Klassen einteilen [9]:

- Aluminium-/Silizium-Quellen
- Template (ein- oder mehrwertige Kationen)
- Mineralisierer (Hydroxidionen)
- Lösungsmittel (meist H_2O , seltener Alkohol)
- Impfkristalle (optional)

Als Silizium-Quellen kommen üblicherweise pyrogene Kieselsäuren, Kieselsole und Natronwasserglas zur Anwendung. Für die Aluminium-Quellen wird häufig auf Aluminium-Salze von Mineralsäuren und Aluminiumoxide zurückgegriffen. Template werden als strukturbildende Additive eingesetzt, um die Zeolithe während der Synthese zu stabilisieren. Mineralisierer lösen die amorphen Alumosilikate während des Synthesevorgangs auf und verbessern die Löslichkeit der Aluminium- und Silizium-Quellen [9]. Die Zugabe von Impfkristallen kann erfolgen, um die Keimbildung und das Kristallisationsvermögen zu steigern.

Verwendet man Geopolymere als Ausgangsmaterialien für die Zeolith-Synthese, so übernehmen diese eine doppelte Funktion als sowohl Silizium- wie auch Aluminium-Quellen. Die Verwendung von Natronlauge als Lösungsmittel agiert dabei in doppelter Weise als Mineralisierer. Da die gelösten Na^+ -Kationen der verwendeten Lauge als Template agieren, kann auf die separate Zugabe von weiteren Templaten theoretisch verzichtet werden. Die eigentliche Zeolith-Synthese lässt sich in vier Stadien einteilen [10]:

- Bildung eines reaktionsfähigen Synthese-Gels
- Erzielung einer Übersättigung
- Beginn der Keimbildung
- Auskristallisation und Kristallwachstum

Im ersten Schritt bildet sich zunächst aus den Ausgangsmaterialien ein reaktionsfähiges Gel. Dabei kommt es zu einem amorphen Niederschlag in Form von Alumosilikaten. Im Anschluss an die Niederschlagsbildung kommt es zu einer Übersättigung der Lösung. Ist diese erreicht, kann es zur Keimbildung kommen, die anschließend in ein Auskristallisieren übergeht. Die genauen Prozesse des Kristallwachstums sind noch nicht vollständig geklärt. Das Zusammenspiel aller einfließenden Faktoren führt zu einem sehr komplexen Vorgang, sodass hier nur die wichtigsten Einflussgrößen auf die Zeolith-Bildung aufgezählt werden können [10]:

- pH-Wert der Lösung
- Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien
- Temperatur, Heizrate, Synthesedauer
- Zugabe von Impfkristallen etc.

Im Vergleich zu den bisher erfolgreich eingesetzten bindemittelbasierten und bindemittelfreien Zeolith-Körpern, wird in dem hier vorgestellten Forschungsprojekt kein natürliches oder synthetisch hergestelltes Zeolith-Granulat als Ausgangsmaterial benötigt. Im hier angestrebten Verfahren entsteht der Zeolith durch Hydrothermal-Synthese bei moderaten Temperaturen zwischen 75 bis 120 °C direkt nach der Aushärtung eines Geopolymers, was zu einer deutlichen Kostenersparnis führen kann, da vor allem die etablierten Zeolith-Synthesen entweder verfahrenstechnisch aufwendiger sind (z. B. Sol-Gel-Verfahren) oder bei den bisher etablierten Hydrothermal-Synthesen der Einsatz von Impfkristallen bzw. Templaten notwendig ist. Zudem wird der Verfahrensschritt des Homogenisierens eines Schlickers aus Zeolith-Granulat und einem temporären oder dauerhaften Bindemittel eingespart.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Zunächst sollen einfache Grundkörper (z. B. Würfelform) aus Geopolymeren hergestellt werden. Als Ausgangsmaterialien für die Geopolymer-Herstellung dienen vornehmlich Recycling-Materialien oder deren Mischungen:

- Ziegelschleifstaub
- Flugasche
- Betonbauschutt

Diese Recycling-Materialien werden mit Wasserglas, VE-Wasser und NaOH gemischt und homogenisiert. Der flüssige Ansatz wird in würfelförmige Polysiloxan-Formen gegossen und über einen Zeitraum von 28 Tagen ausgehärtet. Anschließend werden die Abmessungen und Dichten bestimmt.

Die so hergestellten Geopolymer-Grundkörper sollen in einem nachgeschalteten Schritt durch Hydrothermal-Synthese in formstabile Zeolithe umgewandelt werden. Dazu werden die ausgehärteten Ansätze zusammen mit Natronlauge (Tabelle 1) in PTFE-Flaschen überführt und bei Temperaturen zwischen 75 bis 120 °C über einen Zeitraum von 6 bis 48 Stunden in einem Trockenschrank gelagert.

Parameter	cNaOH [mol/l]	Temperatur [°C]	Zeit [h]
Werte	0,25	75	6
	0,50	90	12
	1,00	105	24
	2,00	120	48
Anzahl der Variationen	4	4	4

Tab. 1: Reaktionsparameter für die Hydrothermal-Synthese von Zeolithen aus würfelförmigen Geopolymeren

Durch anschließendes Quenching im Eisbad wird die Reaktion nach der Lagerung im Trockenschrank abgebrochen. Die entstandenen Zeolith-Probekörper werden auf ihre Formstabilität untersucht und die Längenmaße aufgenommen. Um zu prüfen, ob bei der Hydrothermal-Synthese Zeolithe entstanden sind, werden die Proben einer XRD-Analyse unterzogen. Die Ausgangsmaterialien und Versuchsparameter für die Herstellung der besten Proben werden anschließend zur Präparation von Zeolith-Körpern mit einfacher Hohlkörper-Geometrie verwendet. Die hergestellten Zeolith-Hohlkörper werden auf ihre Formstabilität untersucht, vermessen und mittels XRD-Analyse charakterisiert. Damit sind die wichtigsten Ziele des Forschungsprojekts:

- Herstellung von Geopolymer-Grundkörpern aus Recycling-Materialien
- Hydrothermal-Synthese von Zeolithen aus Geopolymeren mit einfacher Parameterstudie der Reaktionsbedingungen
- Charakterisierung der entstandenen Zeolith-Grundkörper
- Herstellung und Charakterisierung einfacher Zeolith-Hohlkörper

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Rohstoffe und Geopolymer-Herstellung

In einem ersten Schritt werden aus verschiedenen Recyclingmaterialien, Wasser und Natronlauge Geopolymere hergestellt, die im Anschluss zu quaderförmigen Proben mit einer Grundfläche $L \times B = 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ und einer Höhe H im Bereich zwischen 20–30 mm zugeschnitten werden. Die Geopolymer-Zusammensetzungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Probenbezeichnung	Ziegelbruch [Gew.-%]	Flugasche [Gew.-%]	Betonbauschutt [Gew.-%]	Wasser [Gew.-%]	Natronlauge [Gew.-%]
BS_S4	79,3	0	0	15,9	4,8
CR_1	0	61,9	30,9	1,5	5,7
CR_2	0	46,4	46,4	1,5	5,7
CR_3	0	30,9	61,9	1,5	5,7

Tab. 2: Rezepturen für die Herstellung der Geopolymer-Proben

Für die Herstellung der Geopolymere wird jeweils eine Aktivatorlösung, bestehend aus Wasser, NaOH-Plättchen und flüssigem Wasserglas (Betol 39 T), benötigt, in der die angegebenen Zuschlagstoffe gemäß Rezeptur (Tabelle 2) eingemischt werden. Nach der Gießformgebung werden die Proben bei einer Temperatur von 85 °C über einen Zeitraum von 48 Stunden im Trockenschrank ausgehärtet.

Vor der eigentlichen Hydrothermal-Synthese werden die gesägten und geschliffenen Geopolymer-Probekörper vermessen und gewogen sowie deren Volumen und die Rohdichten bestimmt. Dabei werden von jeder Rezeptur geeignete Nullproben entnommen, um nach den Hydrothermal-Synthesen der übrigen Geopolymer-Proben einen Vergleich mit den unbehandelten Geopolymeren durchführen zu können.

Hydrothermal-Synthese

Für die Durchführung der Hydrothermal-Synthesen der Geopolymere werden die in Tabelle 3 aufgeführten Reaktionsparameter eingehalten. Mit der Parameterstudie soll der Einfluss der Reaktionsparameter Temperatur, Zeit sowie Laugenkonzentration $c\text{NaOH}$ bei der Umwandlung der Geopolymere hin zu Zeolithen untersucht werden. In Tabelle 3 sind die verschiedenen Parametervariationen aufgeführt.

Reaktionsparameter	Proben	cNaOH [mol/l]	Temperatur [°C]	Zeit [h]
Werte	S4	0,25	75	6
	CR_1	0,50	90	12
	CR_2	1,00	105	24
	CR_3	2,00	120	48
Variationen		4	4	4

Tab. 3: Reaktionsparameter zur Durchführung der Hydrothermal-Synthesen

Es ist nicht möglich, aus jeder Materialkombination (Tabelle 2) einen formstabilen Zeolith-Probekörper herzustellen. Für jede der Proben wird eine Nullprobe als Referenz zurückbehalten, die nicht hydrothermal umgesetzt wird, um später Rückschlüsse auf materialseitige Veränderungen der Zeolith-Proben ziehen zu können.

Für die Durchführung der Hydrothermal-Synthesen werden insgesamt 82 geschliffene Geopolymer-Probekörper jeweils einzeln in verschließbare Teflonflaschen eingelegt und je nach Probengröße bis zu einer Höhe der Teflonflasche von 50–60 % mit Natronlauge gefüllt. Anschließend werden die verschlossenen Flaschen in beheizbare Trockenschränke eingestellt. Gemäß der in Tabelle 3 angegebenen Reaktionsparameter werden die Flaschen nach 6, 12, 24 und 48 Stunden entnommen und zunächst für jeweils 30 Minuten an Luft abgekühlt. Im Anschluss werden die Flaschen für weitere 30 Minuten in einem kalten Wasserbad bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Diese Vorgehensweise ist deshalb notwendig, um den innerhalb der Teflonflaschen aufgebauten Gasdruck auf ein sicheres Niveau abzusenken, bevor die Flaschen geöffnet werden können. Nach dem Öffnen werden die „Geopolymer“- bzw. jetzt „Zeolith“-Proben entnommen und in ein separates Wasserbad gelegt. Nach 15-minütiger Lagerung wird das Wasser ausgetauscht und der Prozess wiederholt. Das Auswaschen der Proben mit Wasser dient der Ausschleusung nicht umgesetzter Natronlauge. Danach werden die Proben für 24 Stunden an Luft getrocknet und im Anschluss daran nochmals im Trockenschrank bei einer Temperatur von 40 °C bis zur vollständigen Trocknung gelagert.

Formstabilität

Die Formstabilität der Proben nach der Hydrothermal-Synthese wurde rein qualitativ durch optische und händische „Inaugenscheinnahme“ bestätigt. Abbildung 1 zeigt die getrockneten Zeolith-Proben nach der Hydrothermal-Synthese von Geopolymer-Vorstufen. Aus der Untersuchung ging hervor, dass alle Proben ihre äußere Form behalten haben. Die ausreichende Festigkeit der Proben wurde rein qualitativ durch Handdruck-Prüfung bestätigt.

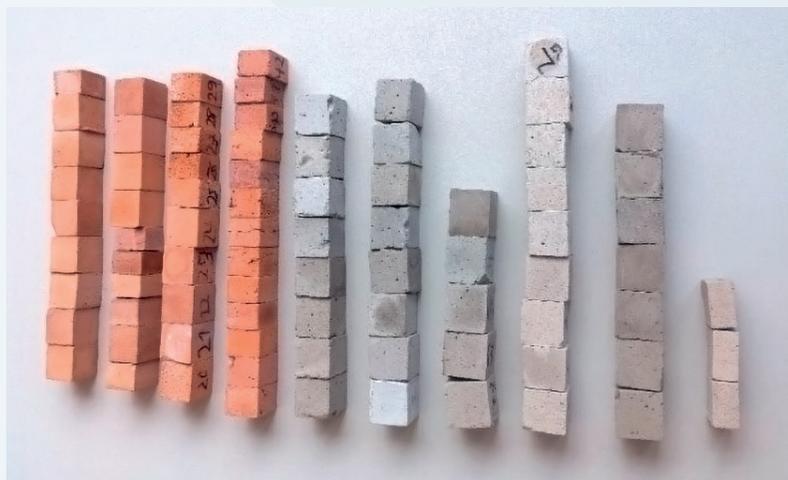


Abb. 1: Zeolith-Proben nach der Hydrothermal-Synthese von Geopolymeren. (Foto: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Um die Maßhaltigkeit der Proben vor und nach der Hydrothermal-Synthese auch messtechnisch zu bestätigen, wurden jeweils vor und nach der Synthese die jeweiligen Probenabmessungen aufgenommen und die zugehörigen Volumina berechnet. Die Ergebnisse dieser Messungen und die ermittelten Abweichungen von den Sollwerten sind für die S4-Reihe in Abbildung 2 und für die CR-Reihen in Abbildung 3 zusammengefasst.

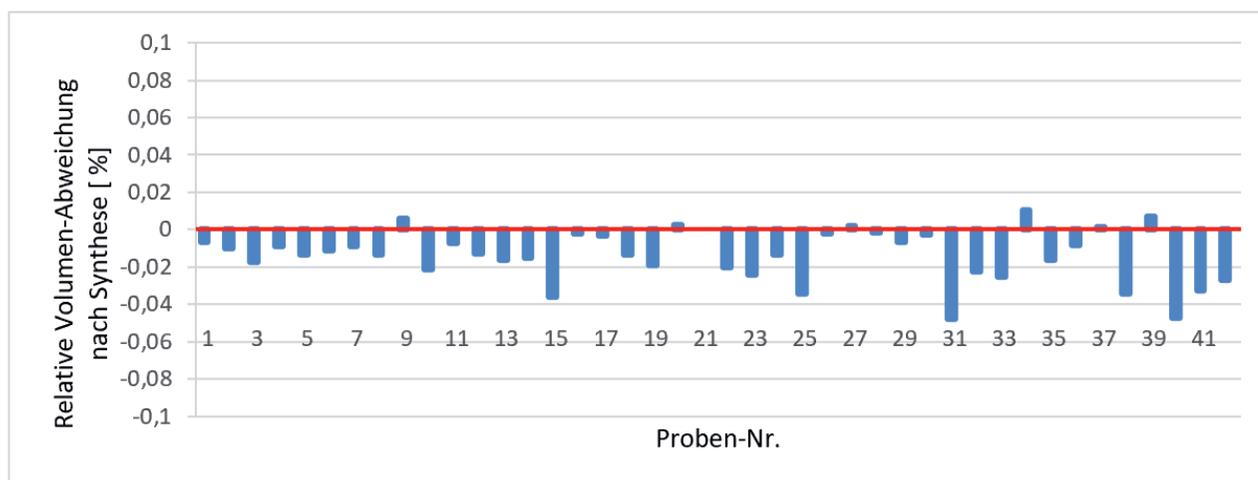


Abb. 2: Abweichungen der Volumen-Maßhaltigkeiten der S4-Reihe vom jeweiligen Ausgangswert (rote Linie). (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Für die S4-Reihe ergibt sich eine geringe Tendenz zur Volumen-Abnahme der Proben durch die Hydrothermal-Synthese (Abb. 2). Für die CR-Reihen wurde eine geringe Volumen-Zunahme nach der Synthese beobachtet.

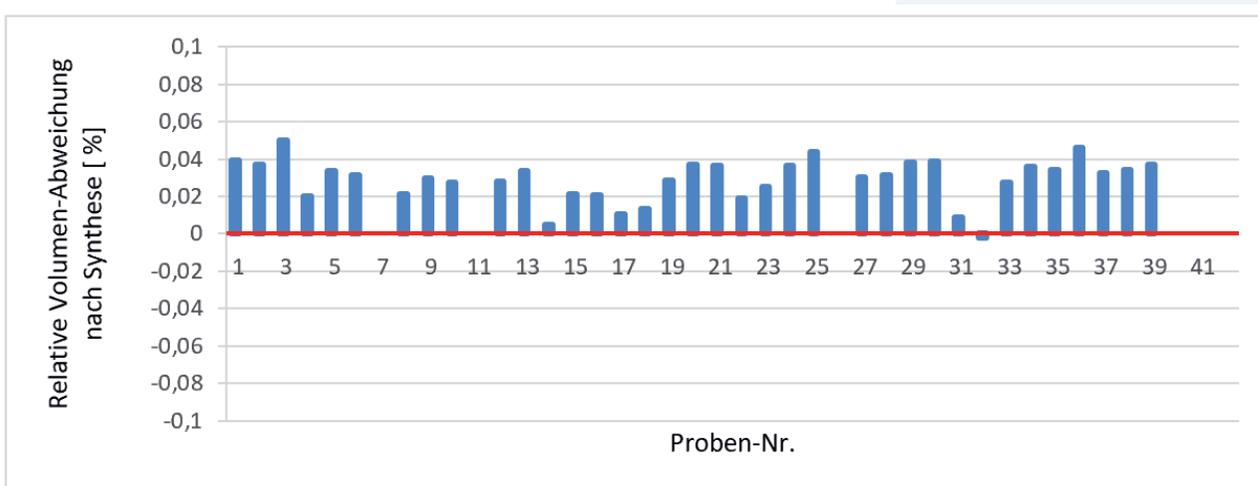


Abb. 3: Abweichungen der Volumen-Maßhaltigkeiten der CR-Reihen vom jeweiligen Ausgangswert (rote Linie). (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Röntgen-Analysen der Geopolymer-Proben nach der Hydrothermal-Synthese (XRD)

Bei den Auswertungen der XRD-Analysen werden bei diversen Proben Peaks detektiert, welche die Ausbildung verschiedener Zeolith-Typen bestätigen. Am häufigsten wird die Bildung der Zeolithe P (Na-exchanged), P1 (Na-exchanged), Analcim sowie Zeolith SSZ-16 beobachtet. Dabei zeigt sich ein beachtlicher Unterschied in der Zeolith-Bildung, basierend auf bestimmten Ausgangsmaterialien sowie bestimmter Variation der Reaktionsparameter. Eine Übersicht über alle detektierten Zeolith-Verbindungen und die jeweils eingestellten Reaktionsparameter zeigt Tabelle 4.

Probe	Temperatur [°C]	Zeit [h]	Konzentration [mol/l]	Gefundene Zeolithe
Cr 3-3-1	90	6	0,25	keine
Cr 3-3-2	90	6	0,50	keine
Cr 3-3-3	90	6	1,00	keine
Cr 3-3-4	90	6	2,00	keine
S4 17	105	6	0,25	Zeolith P (Na-Exchanged) / Analcim
S4 24	105	6	0,50	Zeolith P (Na-Exchanged) / Analcim
S4 39	105	6	1,00	Zeolith P1 (Na-Exchanged) / Zeolithe SSZ-16
S4 14	105	6	2,00	Zeolith P1 (Na-Exchanged) / Analcim
S4 1	120	6	0,25	keine
S4 2	120	6	0,50	Zeolith P (Na-exchanged)
S4 11	120	6	1,00	Zeolith P (Na-exchanged)
S4 22	120	6	2,00	Zeolith P2 / P (Na-exchanged) /Analcim
S4 7	120	12	0,25	Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 18	120	12	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim 10
S4 23	120	12	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim 10
S4 36	120	12	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 16	75	24	0,25	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
S4 5	75	24	0,50	keine
S4 28	75	24	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 37	75	24	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 3	90	24	0,25	Keine
S4 20	90	24	0,50	Zeolith P1 / P2 (Na-exchanged)
S4 26	90	24	1,00	Zeolith P1 (Na- exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 19	90	24	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged)
Cr 1-3 1	90	24	0,25	Analcim
Cr 1-3 4	90	24	0,50	Analcim
Cr 1-3 5	90	24	1,00	Analcim
Cr 1-3 6	90	24	2,00	Analcim
S4 6	105	24	0,25	Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 32	105	24	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 34	105	24	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 33	105	24	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
Cr 2-3 1	105	24	0,25	Analcim
Cr 2-3 12	105	24	0,50	Analcim
Cr 2-3 13	105	24	1,00	Zeolith P (Na-exchanged)
Cr 2-3 5	105	24	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 13	120	24	0,25	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcime 1C
S4 27	120	24	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 30	120	24	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 41	120	24	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith-SSZ 16
Cr 2-3 2	120	24	0,25	Analcim
Cr 2-3 10	120	24	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged)
Cr 2-3 11	120	24	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
Cr 2-3 6	120	24	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged)
Cr 3-2 5	120	24	0,50	Zeolith P (Na-exchanged)
Cr 3-2 6	120	24	1,00	Zeolith P (Na-exchanged)
Cr 3-2 7	120	24	2,00	Analcim / Zeolith P1 (Na-exchanged)

Probe	Temperatur [°C]	Zeit [h]	Konzentration [mol/l]	Gefundene Zeolithe
S4 4	75	48	0,25	Keine
S4 9	75	48	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 29	75	48	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 35	75	48	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 40	90	48	2,00	Zeolith P1 (na-exchanged) / Zeolith SSZ -16
Cr 1-3 2	90	48	0,25	Analcim
Cr 3-1 1	90	48	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged)
Cr 3-1 2	90	48	1,00	Keine
Cr 3-2 1	90	48	0,50	Keine
Cr 3-2 2	90	48	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 10	105	48	0,25	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim 1O
S4 25	105	48	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 31	105	48	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
S4 42	105	48	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
Cr 1-3 3	105	48	0,25	Analcim
Cr 2-3 14	105	48	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
Cr 2-3 15	105	48	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
Cr 2-3 16	105	48	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
Cr 3-2 3	105	48	0,50	Keine
Cr 3-2 4	105	48	1,00	Zeolith P (Na-exchanged)
S4 8	120	48	0,25	Analcim C1 / Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 12	120	48	0,50	Analcim C1 / Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 15	120	48	1,00	Analcim / Zeolith P1 (Na-exchanged)
S4 38	120	48	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Zeolith SSZ-16
Cr 2-3 3	120	48	0,25	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
Cr 2-3 7	120	48	0,50	Zeolith P1 (Na-exchanged) / Analcim
Cr 2-3 8	120	48	1,00	Zeolith P1 (Na-exchanged)
Cr 2-3 9	120	48	2,00	Zeolith P1 (Na-exchanged)
Cr 3-2 8	120	48	0,50	Analcim 1M / Zeolith P (Na-exchanged)
Cr 3-2 9	120	48	1,00	Analcim 1O / Zeolith Na-LSX

Tab. 4: Zeolith-Bildungen und Reaktionsparameter bei der Hydrothermal-Synthese

Von den insgesamt 82 durch Hydrothermal-Synthese behandelten Proben konnten in 66 Fällen Zeolithe nachgewiesen werden. Von den 16 Proben, in denen keine Zeolithe nachweisbar waren, gehörten 5 Stück zu den Nullproben-Reihen, die nicht der Hydrothermal-Synthese unterzogen wurden. Erwartungsgemäß wurde in den nicht durch Hydrothermal-Synthese behandelten Nullproben der CR-1-3-Reihe keine Zeolithe gefunden. Allerdings wurde in einer einzigen Geopolymer -Nullprobe der S4-Reihe auch ohne Hydrothermal-Behandlung die Anwesenheit eines Zeoliths der Klasse P in geringen Anteilen festgestellt. Das widerspricht insofern nicht der Erwartung, da die Umwandlungen von amorphen Alumosilikaten in kristalline Zeolithe auch einen natürlich vorkommenden Prozess darstellen. Im Folgenden wird auf den Einfluss der einzelnen Reaktionsparameter auf die Zeolith-Bildung eingegangen.

Einfluss der Konzentration auf die Zeolith-Bildung

Für jede Hydrothermal-Synthese einer Probe werden die Reaktionsparameter Temperatur [°C] und Zeit [h] festgehalten, während die Konzentration cNaOH [mol/l] variiert wird. Die genauen Parameter sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Probenbezeichnung	Temperatur [°C]	Zeit [h]	Konzentration cNaOH [mol/l]
S4_1	120	6	0,25
S4_2	120	6	0,50
S4_11	120	6	1
S4_22	120	6	2

Tab. 5: Variation der NaOH-Konzentration bei der Hydrothermal-Synthese von Zeolithen aus Geopolymeren

Aus der Auswertung der XRD-Analysen geht hervor, dass sich ab einer NaOH-Konzentration von 0,5 mol/l Peaks in den Winkelbereichen 12,5° und 17–18° bilden, die bei der niedrigeren NaOH-Konzentration von cNaOH = 0,25 [mol/l] tendenziell abwesend sind. Der Peak bei ca. 12,5° weist auf die Bildung des Zeoliths P (Na-exchanged) hin (eindeutiger Nachweis bei 12,465°). Die Klasse der P-Zeolithe zeichnet sich durch die sogenannte GIS-Netzwerkstruktur (benannt nach dem Zeolith Gismondin) aus, die typisch für alle Zeolithe der Klasse P ist. Dabei besteht das ideale Gismondin-Gitter aus einem Paar doppelter Kurbelwellenketten (dcc-chains) parallel zum Richtungsindex [100] und einem weiteren Paar doppelter Kurbelwellen parallel zu Richtungsindex [010], wobei die Einheitszelle ungefähr 10 x 10 x 10 Å misst und $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ beträgt [11]. Verwendung finden die P-Zeolithe vor allem aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften bei der Wasserenthärtung und der Gastrennung im Unterschied zu anderen Zeolith-Typen.

Die Abbildungen 5, 6 und 7 zeigen überdies, wie sich der Anteil der P-Zeolithe mit steigender Laugenkonzentration erhöht, was sich in ausgeprägteren Ausschlägen im relevanten Bereich von 12,5° widerspiegelt. Für die höchsten Konzentrationen kann auch die Bildung von Analcim nachgewiesen werden.

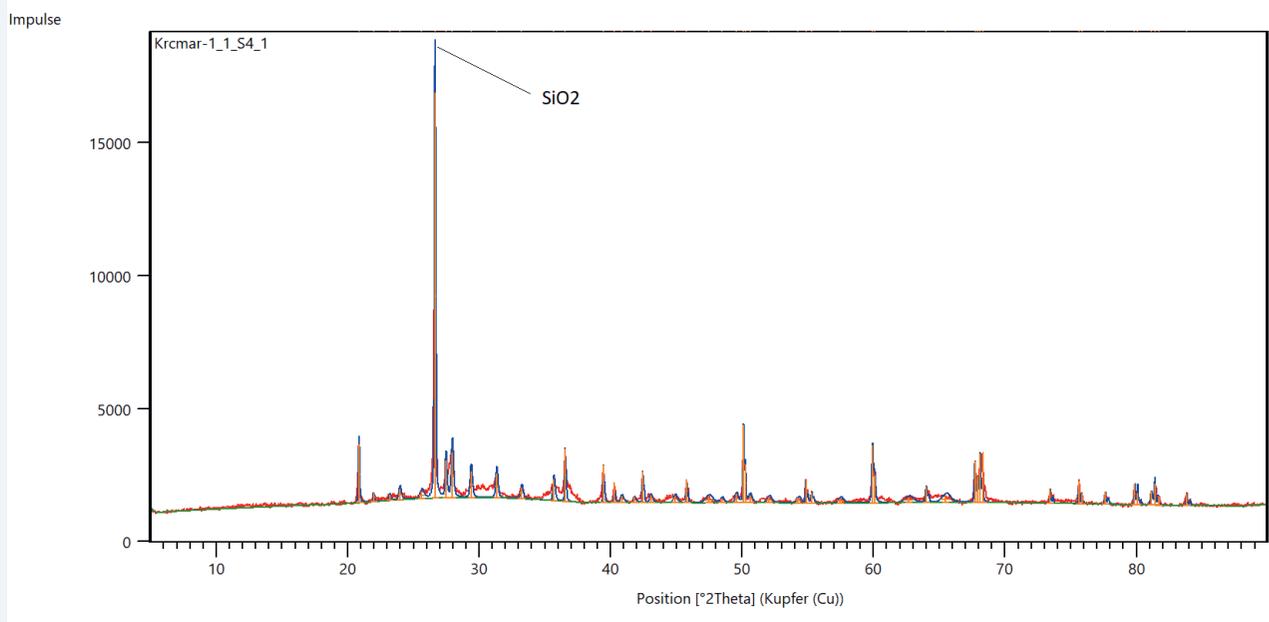


Abb. 4: XRD-Analyse einer behandelten Geopolymer-Probe S4_1 nach der Hydrothermal-Synthese zum Zeolith. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Keine der gefundenen Peaks in Probe S4_1 (Abbildung 4) weist auf die Bildung von Zeolithen hin. Der größte Peak im Winkelbereich 27° ist maßgeblich auf das Vorkommen von Quarz (SiO_2) zurückzuführen. Da alle gemessenen Geopolymer-Proben neben AlO_4 -Tetraedern zu großen Teilen aus SiO_4 -Tetraedern aufgebaut sind, tritt dieser Peak als größter Peak in jeder Messung auf. In den nachfolgend dargestellten XRD-Analysen wird deshalb auf diesen Peak nicht mehr eingegangen.

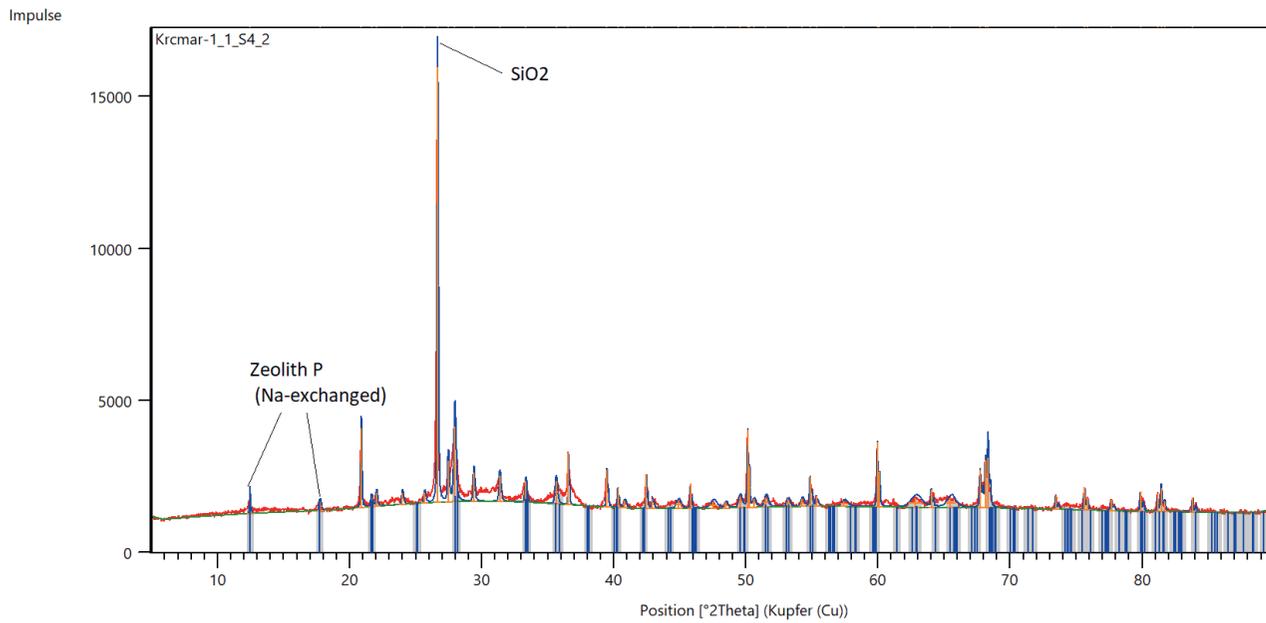


Abb. 5: XRD-Analyse einer behandelten Geopolymer-Probe S4_2 nach der Hydrothermal-Synthese zum Zeolith. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Der durchgeführte Datenbank-Abgleich der gefundenen Peaks der behandelten Geopolymer-Probe S4_2 weist auf das Vorkommen des Zeoliths P (Na-exchanged) hin. Der Score für das Auftreten von Zeolith P liegt bei 29.

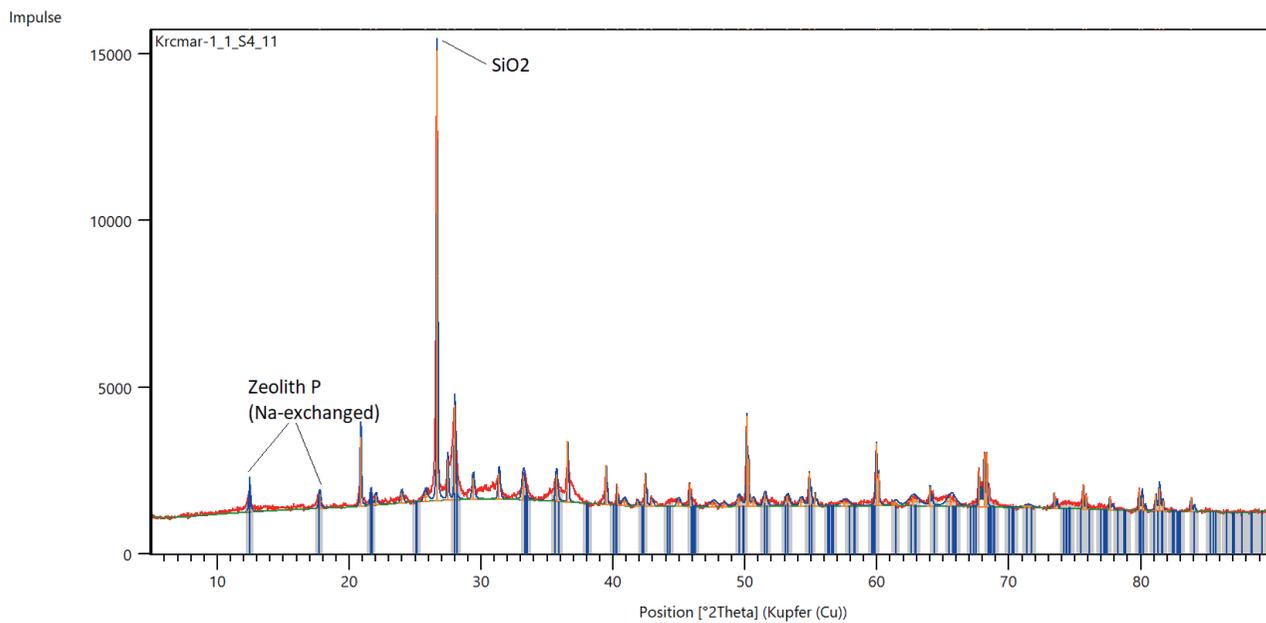


Abb. 6: XRD-Analyse einer behandelten Geopolymer-Probe S4_11 nach der Hydrothermal-Synthese zum Zeolith. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

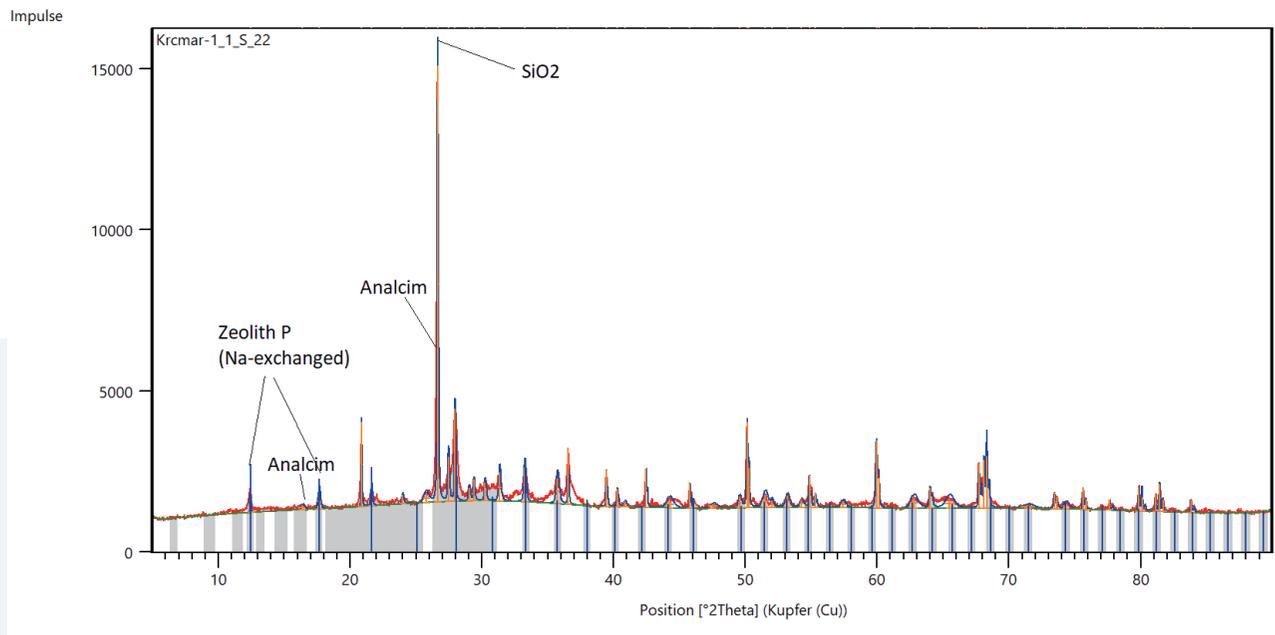


Abb. 7: XRD-Analyse einer behandelten Geopolymer-Probe S4_22 nach der Hydrothermal-Synthese zum Zeolith. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

In der XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_22 werden sowohl der Zeolith P (Na-exchanged) mit einem Score von 44 als auch Analcim mit einem Score von 17 nachgewiesen.

Der Einfluss der NaOH-Konzentration auf die Zeolith-Bildung ist in Abbildung 8 dargestellt. Während bei einer NaOH-Konzentration von 0,25 mol/l in nur 76,5 % der behandelten Proben Zeolithe nachweisbar sind, steigt dieser Anteil linear bis auf 94,4 % der behandelten Proben an, wenn die NaOH-Konzentrationen bis auf 2 [mol/l] erhöht werden.

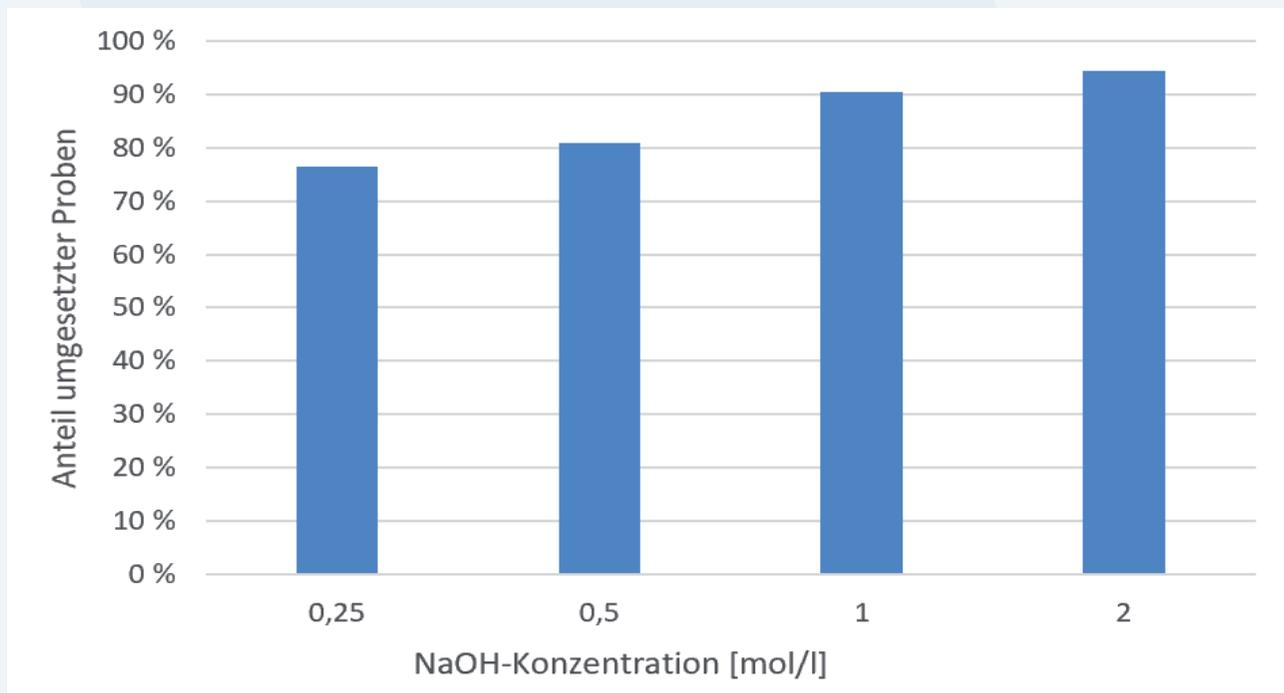


Abb. 8: Zeolith-Bildung der behandelten Geopolymere-Proben der S4-Reihe in Abhängigkeit von der NaOH-Konzentration. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Einfluss der Reaktionszeit auf die Zeolith-Bildung

Der Einfluss der Reaktionszeit auf die Bildung und Ausprägung der Zeolithen bei der Hydrothermal-Synthese wird nachfolgend am Beispiel behandelter Geopolymer-Proben aus der S4-Reihe gezeigt. Dabei werden die Parameter Temperatur und NaOH-Konzentration konstant gehalten (Tabelle 6).

Probenbezeichnung	Temperatur [°C]	Zeit [h]	Konzentration cNaOH [mol/l]
S4_1	120	6	0,25
S4_7	120	12	0,25
S4_13	120	24	0,25
S4_8	120	48	0,25

Tab. 6: Variation der Reaktionszeit bei der Hydrothermal-Synthese von Zeolithen aus Geopolymeren

Aus der XRD-Analyse (Abbildung 9) geht hervor, dass sich nach einer Reaktionszeit von 12 Stunden der für P-Zeolithe (Na-exchanged) charakteristische Peak bei 12,5° ausgebildet hat. Dieser Peak verstärkt sich bei Verlängerung der Reaktionszeiten auf 24 bzw. 48 Stunden, was auf die Bildung größerer Mengen an P-Zeolithen hinweist. Nach einer Reaktionszeit von 24 Stunden findet sich ein weiterer Peak bei ca. 15,8° (Abbildung 9). Dieser Peak weist auf die Bildung des Zeoliths Analcim 10 hin. Analcim zählt zu den Würfel-Zeolithen mit dreidimensionalem orthorhombischem Netzwerk. Die stöchiometrische Zusammensetzung von Analcim wird im Allgemeinen durch die Formel $[\text{Na}_{16-x}(\text{H}_2\text{O})_{16+x}][\text{Al}_{16-x}\text{Si}_{32+x}\text{O}_{96}]$ beschrieben, wobei x zwischen den Werten -3,4 und +4,3 variieren kann. Aufgrund seiner kompakten und diffusionsresistenten Struktur sind nur wenige Anwendungsmöglichkeiten von Analcim als mikroporöses Material in der Literatur beschrieben. Die Bildung von Analcim nimmt bei längeren Reaktionszeiten von 48 Stunden signifikant zu, was aus der zunehmenden Ausprägung des charakteristischen Peaks bei 15,8° abgeleitet werden kann (Abbildung 9).

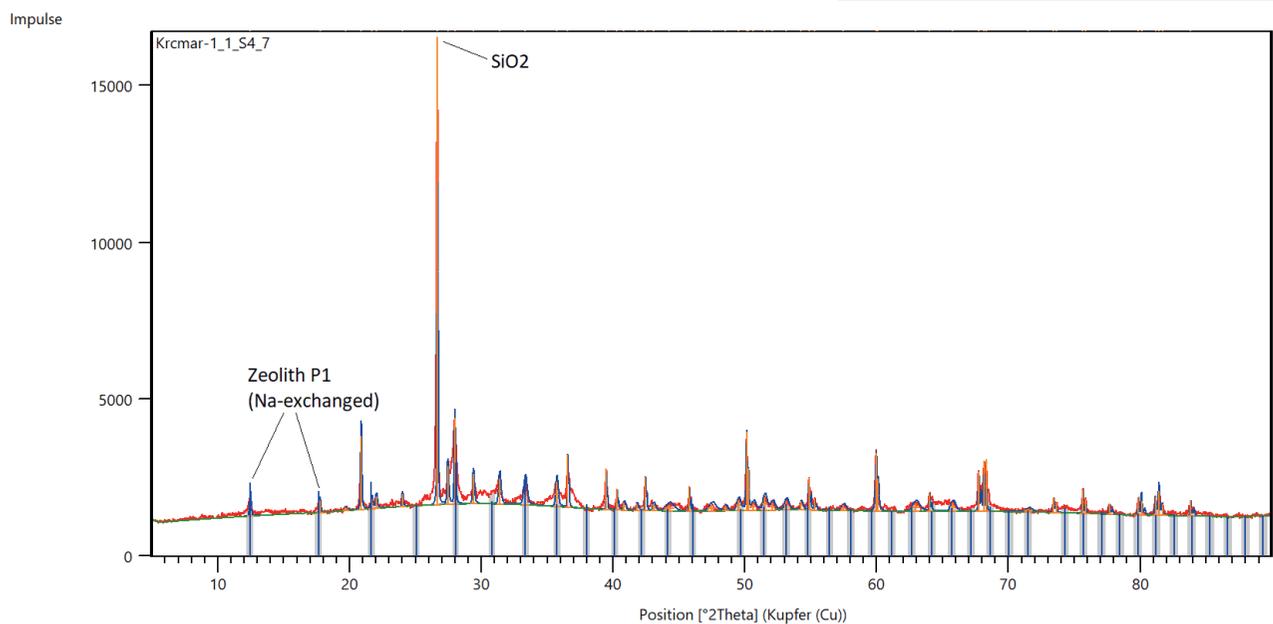


Abb. 9: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_7. Mit zunehmender Reaktionszeit erfolgt die Bildung von P-Zeolith und von Analcim. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Ein Abgleich mit der Datenbank liefert eine Übereinstimmung für die Bildung des Zeoliths P1 (Na-exchanged) mit einem Score von 37.

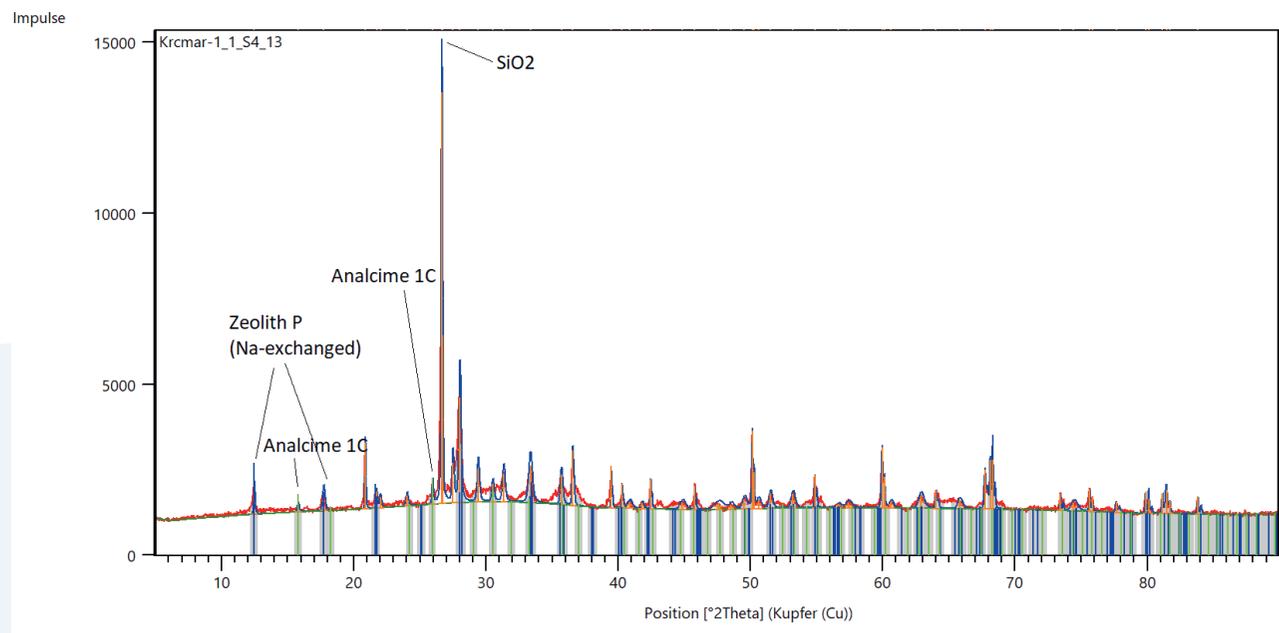


Abb. 10: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_13. Mit zunehmender Reaktionszeit erfolgt die Bildung von P-Zeolith und von Analcim C1. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Das Beugungsdiagramm der Probe S4_13 (Abbildung 10) weist auf die Bildung von P-Zeolithen (Na-exchanged) mit einem Score von 48 sowie von Analcim C1 mit einem Score von 22 hin.

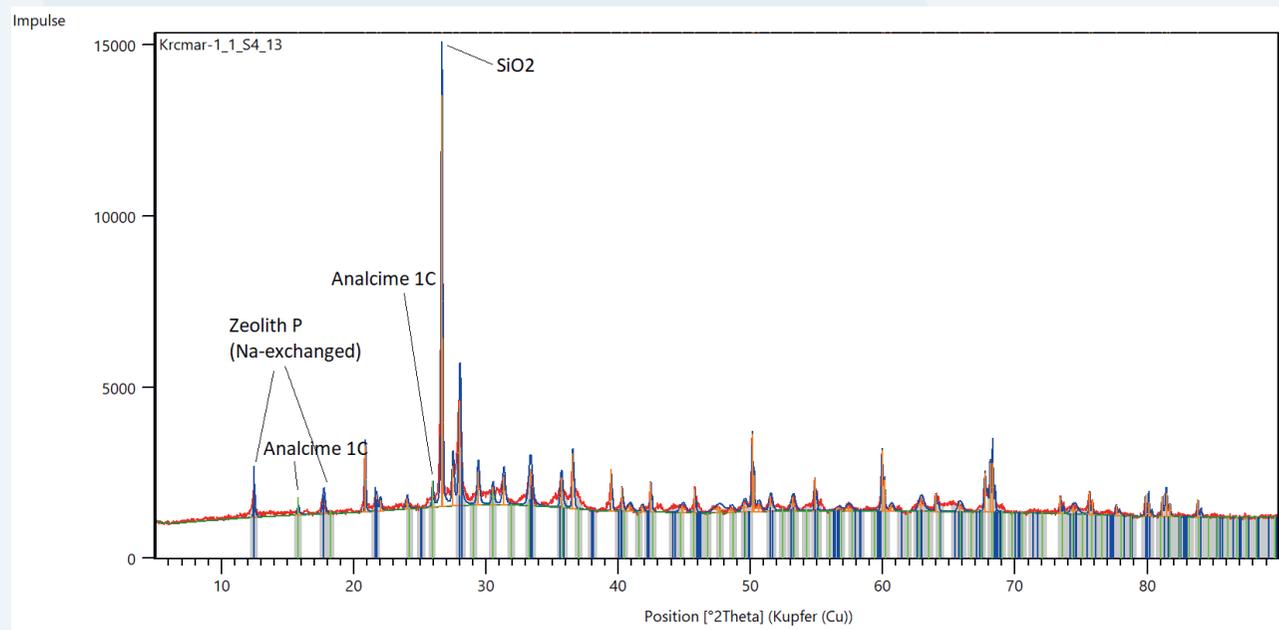


Abb. 11: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_8. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

In der behandelten Geopolymer-Probe S4_8 wird die Bildung des Zeoliths P1 durch einen Peak mit einem Score von 37 eindeutig identifiziert. Mit einem Score von 59 wird außerdem die Ausbildung von Analcim C1 nachgewiesen.

Der Einfluss der Reaktionszeit auf den Umsatz der Zeolith-Bildung ist in Abbildung 12 grafisch dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einer kurzen Haltezeit von 6 Stunden eine Zeolith-Bildung von 41,6 % erreicht wird, während sich bei einer Reaktionszeit von 24 und 48 Stunden jeweils ein Großteil (ca. 90 %) der Geopolymer-Proben in Zeolithe umwandeln lässt. Bei einer Reaktionszeit von 12 Stunden gelang eine 100 %ige Umwandlung in Zeolithe.

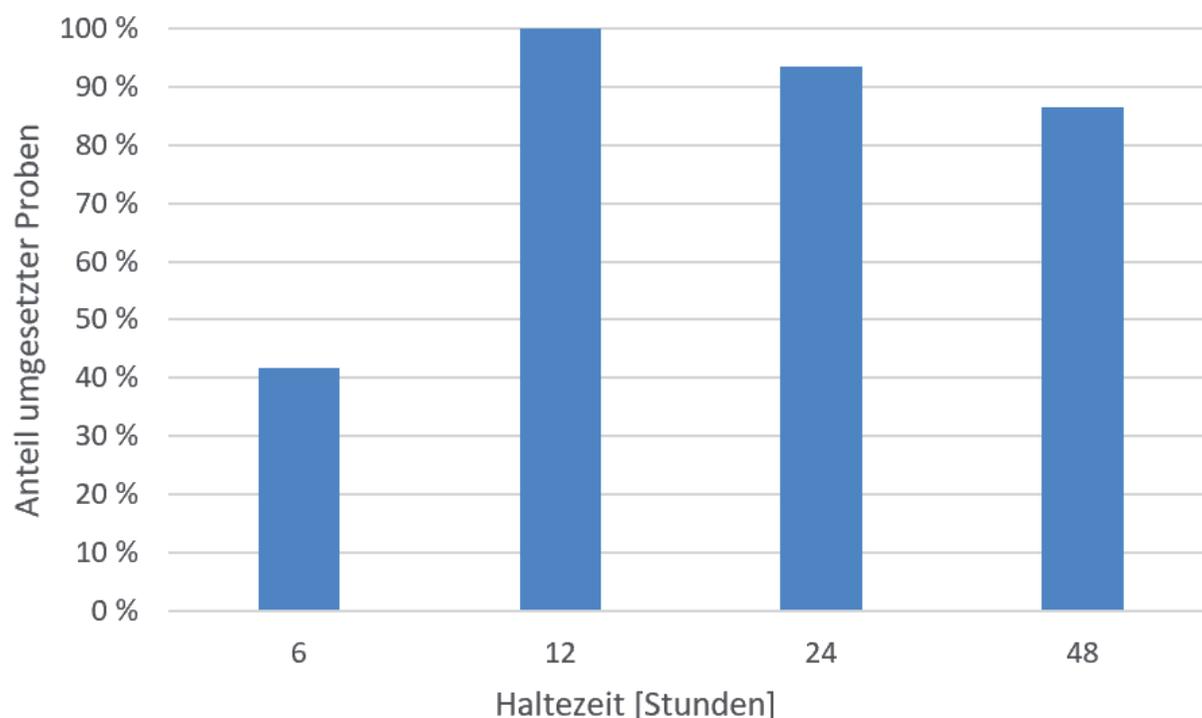


Abb. 12: Einfluss der Reaktionszeiten auf den Umsatz der Zeolith-Bildung. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Einfluss der Temperatur auf die Zeolith-Bildung

Im weiteren Verlauf der Arbeiten wird der Einfluss der Temperatur auf den Umsatz der Zeolith-Bildung untersucht. Dafür werden für die Hydrothermal-Synthesen Temperaturen zwischen 75 °C und 120 °C gewählt. Die dafür verwendeten Proben und Reaktionsparameter für die Hydrothermal-Synthese sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Abbildungen 13 bis 16 zeigen die im Nachgang der Synthesen durchgeführten Ergebnisse der Röntgenuntersuchungen (XRD) an ausgewählten Proben der S4-Reihe.

Probenbezeichnung	Temperatur [°C]	Zeit [h]	Konzentration cNaOH [mol/l]
S4_5	75	24	0,5
S4_20	90	24	0,5
S4_32	105	24	0,5
S4_27	120	24	0,5

Tab. 7: Variation der Temperatur bei der Hydrothermal-Synthese von Zeolithen aus Geopolymeren

Bei der niedrigsten Temperatur von 75 °C für die Hydrothermal-Synthese kann nur bei den höchsten eingestellten NaOH-Konzentrationen und den längsten Reaktionszeiten die Bildung von Zeolithen nachgewiesen werden. Wie aus Abbildung 13 zu entnehmen ist, findet sich keiner der Zeolith-typischen Peaks bei der Probe S4_5, die bei 75 °C thermisch behandelt wurde. Erst bei einer Synthesetemperatur von 90 °C und darüber lässt sich der für P-Zeolithe typische Peak bei einem Winkel von 12,5° nachweisen. Bei noch höheren Synthesetemperaturen findet sich bei diversen Proben ein weiterer Peak bei ca. 8,7°. Dieser Peak weist darauf hin, dass sich in diesen Proben der Zeolith SSZ-16 gebildet hat. Der Zeolith SSZ-16 hat den Strukturtyp AFX ausgebildet, der hexagonal aus gme-, aft- und d6r-Käfigen aufgebaut ist. Zeolithe dieses Strukturtyps zeichnen sich aufgrund der offenen Käfigstrukturen durch ein hohes Potenzial für Katalysator-Anwendungen aus. So wurde beispielsweise der Zeolith SSZ-16 in den letzten Jahren als Katalysator für die selektive Reduktion von Stickstoffoxiden (NOx) mit Ammoniak erfolgreich getestet und verspricht dabei eine fast 100 %ige Umsetzungsrate.

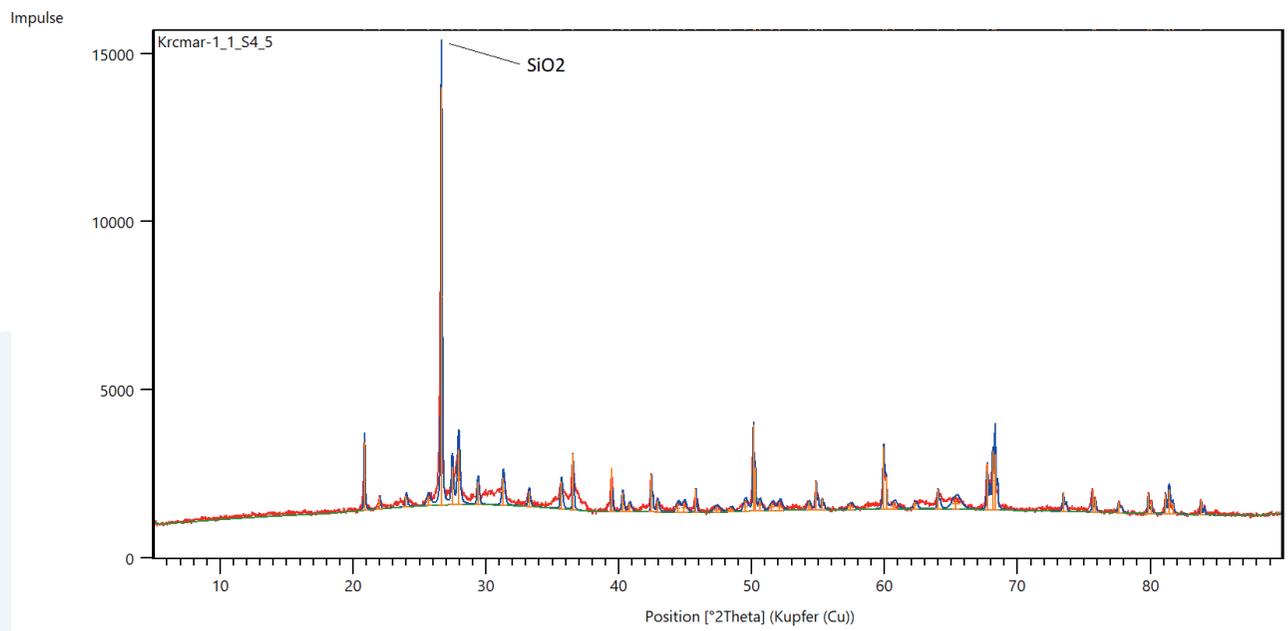


Abb. 13: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_5. Anhand des Beugungsdiagramms kann keine Zeolith-Bildung bei einer Synthesetemperatur von 75 °C nachgewiesen werden. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

In der behandelten Geopolymer-Probe S4_5 kann keine Zeolith-Bildung anhand des Beugungsdiagrammes nachgewiesen werden.

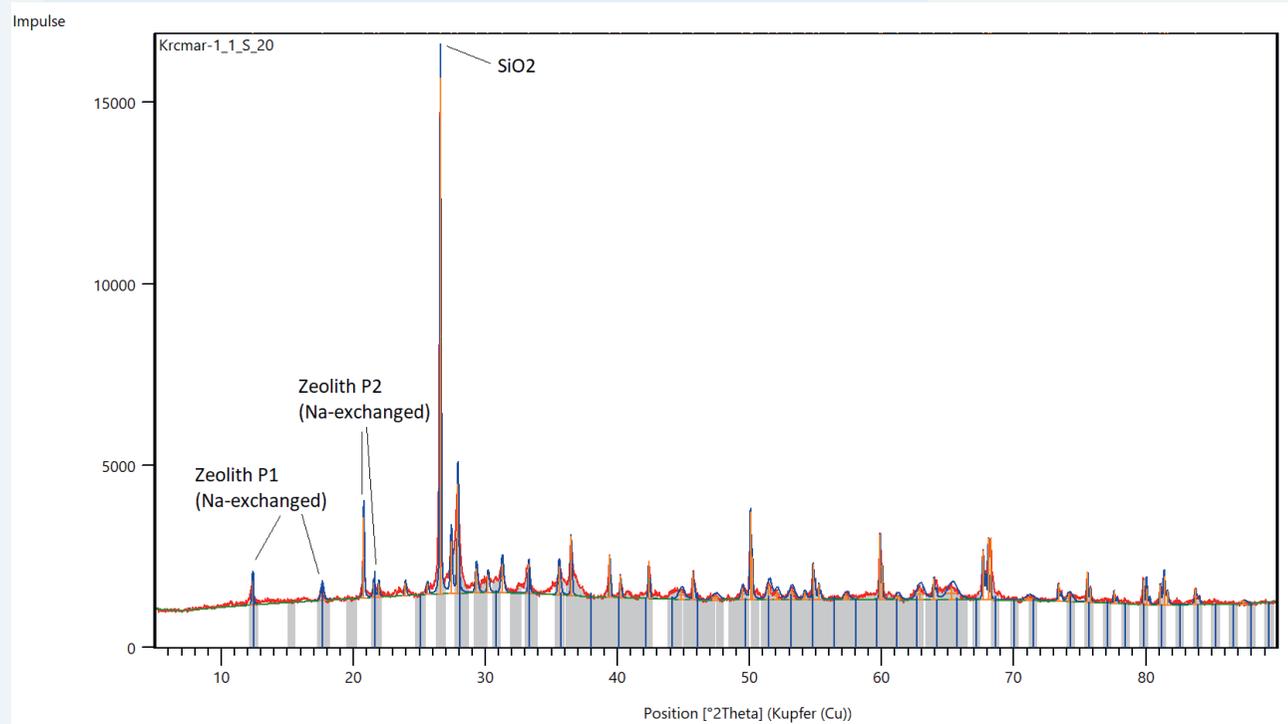


Abb. 14: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_20. Die Bildung der Zeolithe P1 (Na-exchanged) sowie P2 (Na-exchanged) wird anhand der Peaks bei 32° bzw. 28° nachgewiesen. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

In der behandelten Geopolymer-Probe S4_20 können die Zeolithe P1 (Na-exchanged) sowie P2 (Na-exchanged) mit einem Score von 32 bzw. 28 eindeutig identifiziert werden.

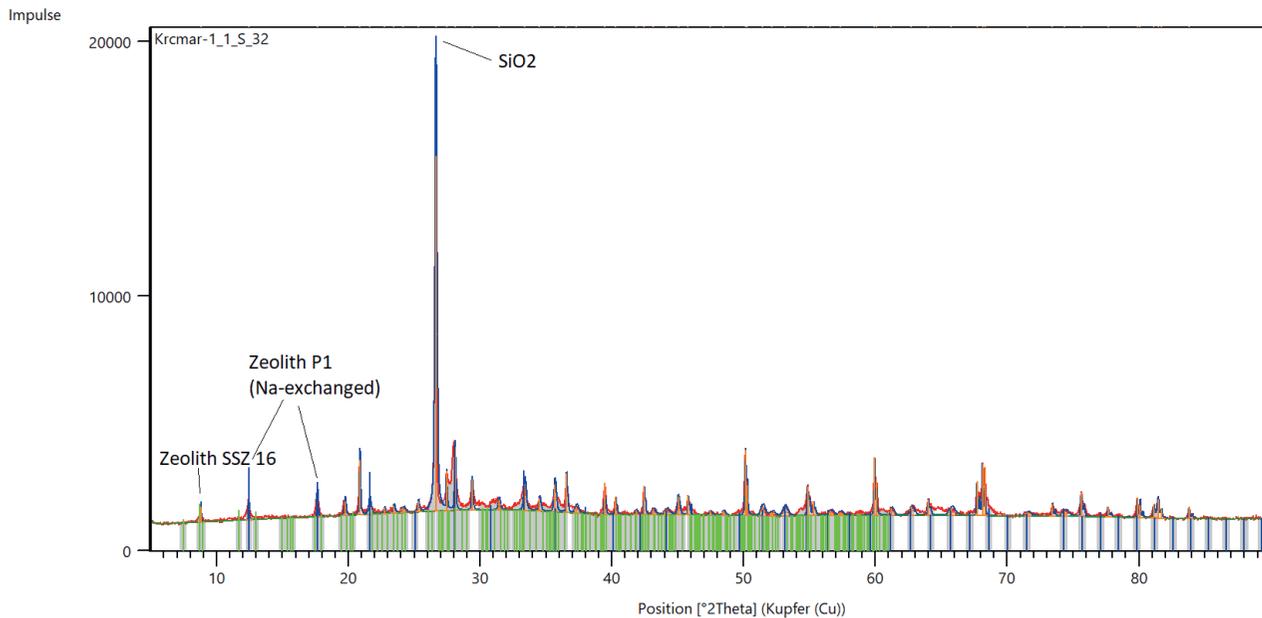


Abb. 15: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_32. Die Bildung der Zeolithe P1 (Na-exchanged) sowie SSZ-16 sind anhand der Röntgenanalyse nachweisbar. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Neben dem Zeolith P1 (Na-exchanged), dessen Peak mit einem Score von 49 identifiziert werden kann, weist der Peak bei $8,7^\circ$ auf die Bildung des Zeoliths SSZ-16 hin.

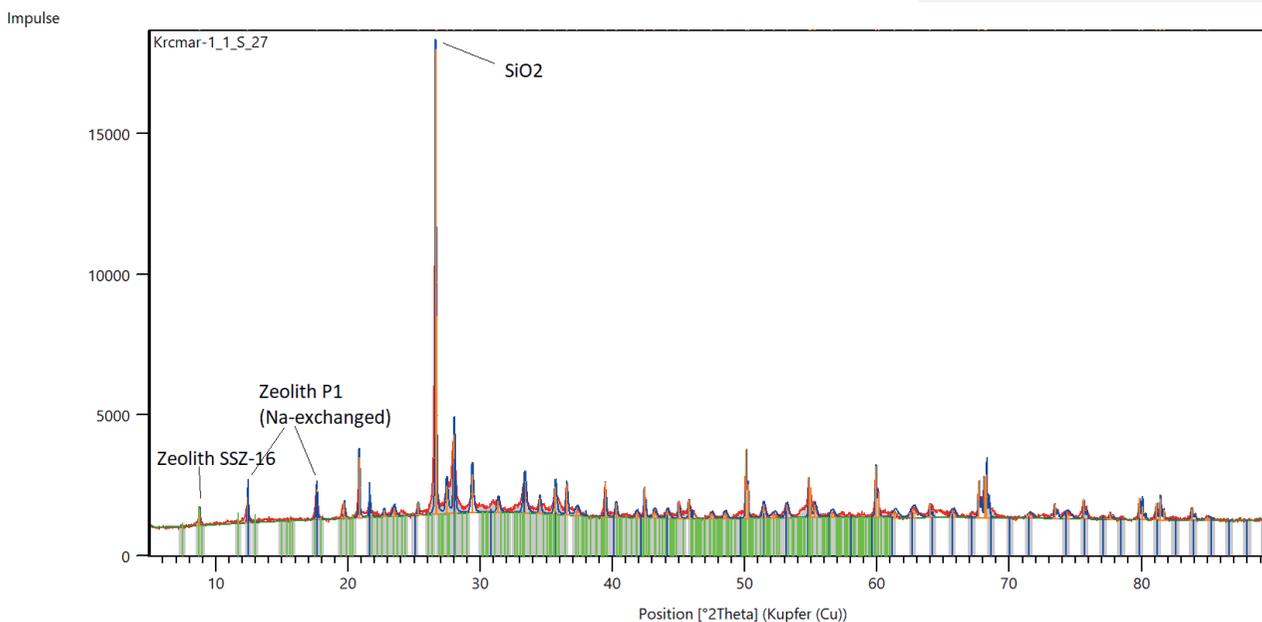


Abb. 16: XRD-Analyse der behandelten Geopolymer-Probe S4_27. In der Probe haben sich der Zeolith P1 (Na-exchanged) sowie der Zeolith SSZ-16 gebildet. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

In der behandelten Geopolymer-Probe S4_27 wird der Zeolith-Typ „P1 (Na-exchanged)“ mit einem Score von 50 nachgewiesen. Außerdem wird die Bildung des Zeoliths SSZ-16 durch einen charakteristischen Peak bei $8,7^\circ$ mit einem Score von 7 gezeigt.

Der Einfluss der Synthesetemperatur auf die Bildung von Zeolithen wird in Abbildung 17 dargestellt. Es zeigt sich ein Trend zu erhöhter Zeolith-Bildung bei größeren Synthesetemperaturen. Während bei einer Temperatur von 90°C mit 61,1 % der geringste Geopolymer-Umsatz zu Zeolithen stattfindet, erfolgt bei Temperaturen ab 105°C ein Umsatz von über 95 % der Geopolymer-Proben zu Zeolithen.

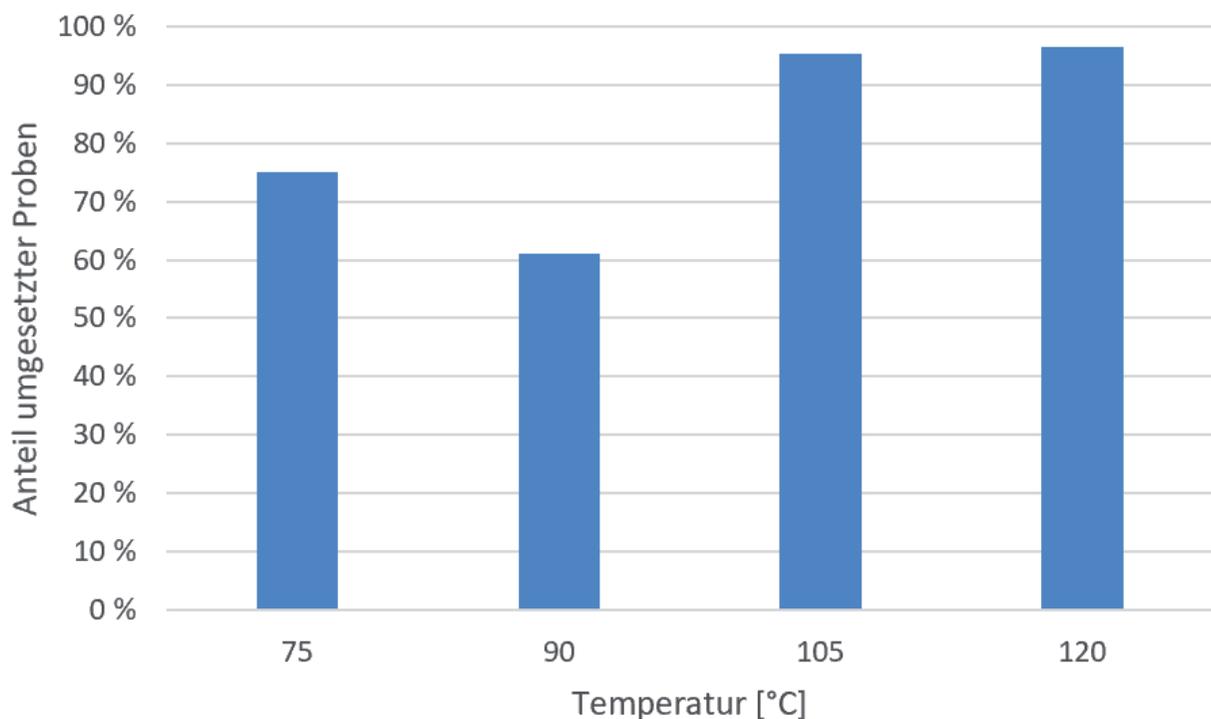


Abb. 17: Einfluss der Temperatur auf den Umsatz aller hier eingesetzten Geopolymere zu Zeolithen. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Basierend auf der experimentellen Datenlage der vorliegenden Parameterstudie, wird die Entstehung von mehreren Zeolith-Typen im Verlauf der Hydrothermal-Synthesen eindeutig nachgewiesen. Von den insgesamt 82 durch Hydrothermal-Synthese behandelten Proben kann die Zeolith-Bildung bei 65 Proben nachgewiesen werden. Einzig in der Nullprobe S4_21 der S4-Reihe konnte der Zeolith P (Na-exchanged) bereits vor der eigentlichen Hydrothermal-Synthese identifiziert werden. Dieses Ergebnis weist auf den nahen Zusammenhang zwischen Geopolymeren und Zeolithen hin, den schon Yan und Xue-Min in ihren Betrachtungen zur Synthese von Zeolithen aus Geopolymeren fanden [5]. Chemisch betrachtet, sind sich die Geopolymere und Zeolithe sehr ähnlich. Die Herstellung der Geopolymere findet bei 85 °C unter Zugabe von NaOH und einer Aktivatorlösung statt. Aus Beobachtungen der Natur und experimentellen Befunden ist bekannt, dass die Zeolith-Bildung im schwach alkalischen Milieu unter hydrothermalen Bedingungen stattfinden kann [12]. Es kann daher angenommen werden, dass diese Reaktionsbedingungen bereits bei der Bildung der Geopolymere zumindest so weit vorlagen, dass sich Zeolithe bereits in der besprochenen Nullprobe bilden konnten. Zeolithe der Klasse P (P1, P2 – (Na-exchanged)) werden am häufigsten nachgewiesen. In 56 von 66 Proben, in denen die Zeolith-Bildung nachgewiesen wird, werden Zeolithe dieser Klasse identifiziert. Dabei findet die Bildung dieser Zeolith-Typen in jedem Temperaturbereich sowie bei allen Konzentrationen und Zeitlängigkeiten statt, jedoch bevorzugt bei Temperaturen über 90 °C und Reaktionszeiten von mindestens 24 Stunden. In 25 der hergestellten Zeolith-Proben werden Zeolithe aus der Analcim-Gruppe identifiziert. Insgesamt werden Hinweise auf die Bildung der Zeolithe Analcim C1, 1M und 1O gefunden. Analcim wird fast ausschließlich bei den Zeolithen gefunden, deren Synthesen bei mindestens 105 °C oder darüber durchgeführt wurden. In den wenigen Fällen, in denen sich Analcim bei Proben, die unter 105 °C behandelt wurden, bildete, waren die Reaktionszeiten niemals kürzer als 24 Stunden. Diese Beobachtung deckt sich mit früheren Ergebnissen von Yan und Xue-Min, die die Analcim-Bildung aus Geopolymeren bei höheren Temperaturen von 180 °C und bei kurzen Haltezeiten nachwiesen [5]. Weiterhin werden in 17 der hergestellten Zeolith-Proben charakteristische Peaks bei 8–9° gefunden, die auf die Bildung des Zeoliths SSZ-16 hindeuten. Die Bildung von SSZ-16 wird vorwiegend bei erhöhten Synthese-Temperaturen von mindestens 105 °C und längeren Reaktionszeiten von mindestens 24 Stunden festgestellt.

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Studie lassen weitere Rückschlüsse auf den Einfluss der eingestellten Reaktionsparameter zu. Bei Betrachtung des Umsatzgrades der gemessenen Proben, also dem Anteil der Proben, in denen Zeolithe jeglicher Art identifiziert werden, fallen deutliche Unterschiede in der Auswirkung der Parameter Zeit, Temperatur und Laugenkonzentration auf. Dabei finden sich große Unterschiede in der Zeolith-Bildung bei verschiedenen Reaktionszeiten. Von den Proben, die über einen Zeitraum von nur 6 Stunden synthetisiert werden, kann nur in 41,1 % der Fälle eine Bildung von Zeolithen beobachtet werden. Ab einer Haltezeit von 12 Stunden wird dagegen ein hoher Umsetzungsgrad zwischen 86,6 bis 100 % erreicht.

Bei der Variation der Laugenkonzentrationen zeichnet sich ein annähernd linearer Zusammenhang ab. Mit höheren Laugenkonzentrationen steigt der Umsetzungsgrad der Proben von 76,5 % bei der geringsten Konzentration von 0,25 mol/l bis hin zu 94,4 % bei einer Konzentration von 2 mol/l.

Der Einfluss erhöhter Temperaturen auf die Zeolith-Bildung zeigt sich in einem sprunghaften Anstieg des beobachteten Umsetzungsgrades. Während die Umsetzungsgrade bei den Temperaturen von 75 °C und 90 °C mit 75 % und 61,1 % eher niedrig ausfallen, lassen sich bei Temperaturen von 105 °C sowie 120 °C in mehr als 95 % der Fälle Zeolithe nachweisen. Dieser sprunghafte Anstieg scheint mit der Beobachtung zusammenzuhängen, dass sich ab einer Temperatur von 105 °C bevorzugt die Zeolithe Analcim und SSZ-16 bilden, während dies bei niedrigerer Temperatur, bis auf wenige Ausnahmen, nicht festgestellt werden kann.

Die Wahl der Ausgangsmaterialien für die Synthese spielt auch eine Rolle bei der Umsetzung. Wird der Anteil der nachgewiesenen Zeolithe, nach der Zuordnung der Ausgangsmaterialien aus der S4-Reihe oder den CR-1-3-Reihen betrachtet, so ergibt sich der in Abbildung 18 dargestellte Vergleich.

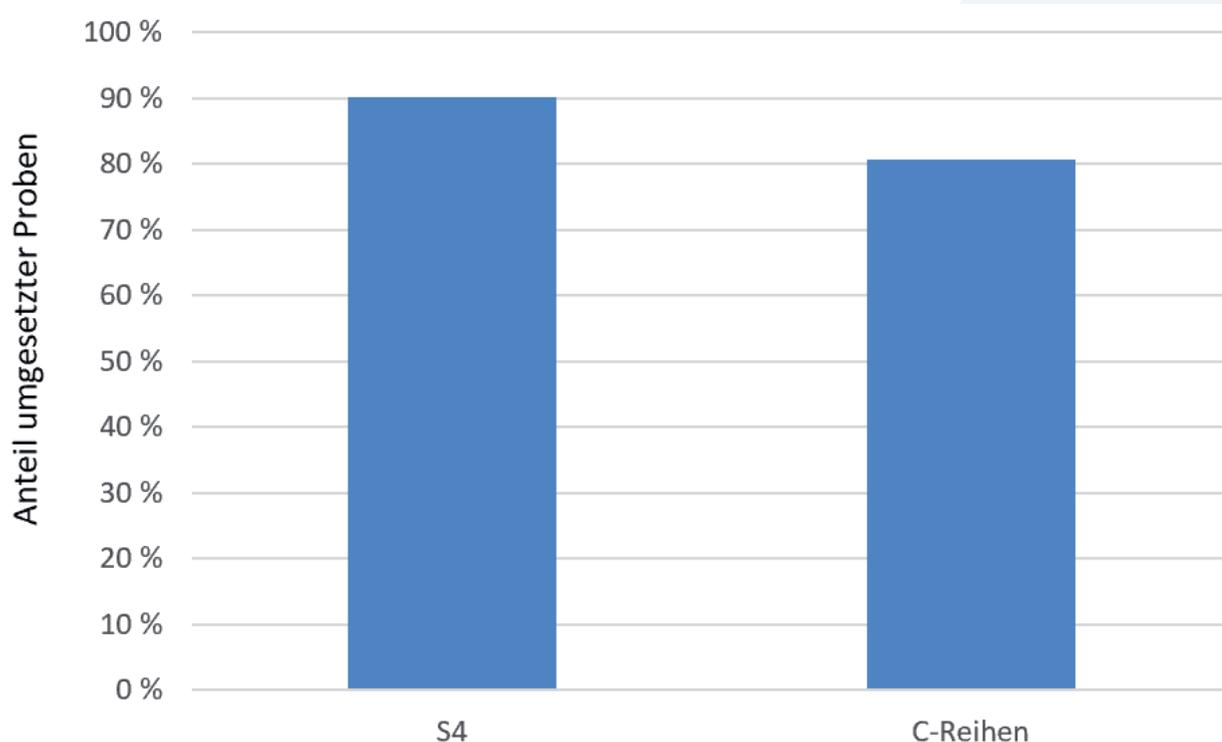


Abb. 18: Umsetzungsgrad der Geopolymer-Reihe S4 sowie der drei CR-Reihen. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Über die gesamte S4-Reihe konnten in 90,2 % der Fälle Zeolith-Bildungen nachgewiesen werden, während dies nur in 80,6 % der CR-Reihen der Fall war. Da der genaue Mechanismus der Zeolith-Bildung noch nicht abschließend geklärt ist, kann nur spekuliert werden, wodurch dieser Unterschied zustande kommt. Die Geopolymere der CR-Reihen zeichnen sich im Durchschnitt durch höhere Festigkeitswerte sowie höhere Dichten aus, die im Zusammenhang mit dieser Beobachtung stehen könnten. Nähere Untersuchungen zum Einfluss der unterschiedlichen mechanischen Kenngrößen der Geopolymere der S4- und der CR-Reihen könnten bessere Erkenntnisse liefern. Aus den Ergebnissen der Parameterstudie lässt sich eine theoretische, ideale Zusammensetzung der betrachteten Parameter ableiten. Diese ist in Tabelle 8 wiedergegeben.

Temperatur [°C]	Zeit [h]	Laugenkonzentration [mol/l]
105 - 120	24 - 48	1 - 2

Tab. 8: Beste theoretische Kombination der Reaktionsparameter

Die Zeolith-Proben, die bei diesen Reaktionsparametern synthetisiert werden, bestätigen empirisch die vorgenannten Annahmen. Die größten Übereinstimmungen bei der Zeolith-Bildung werden durch die XRD-Analyse bei Probe S4_12 identifiziert, die über einen Zeitraum von 48 Stunden, bei Synthese-Temperaturen von 120 °C und einer Laugenkonzentration von 0,5 mol/l synthetisiert wird. Das Beugungsdiagramm der Probe ist in Abbildung 19 aufgeführt, mit deutlich ausgeprägten Peaks, die auf die Existenz der Zeolithe P1 (Na-exchanged) sowie Analcim C1 eindeutig hinweisen. In der Abbildung sind alle Peaks aufgelistet, die das Vorkommen dieser Zeolithe belegen.

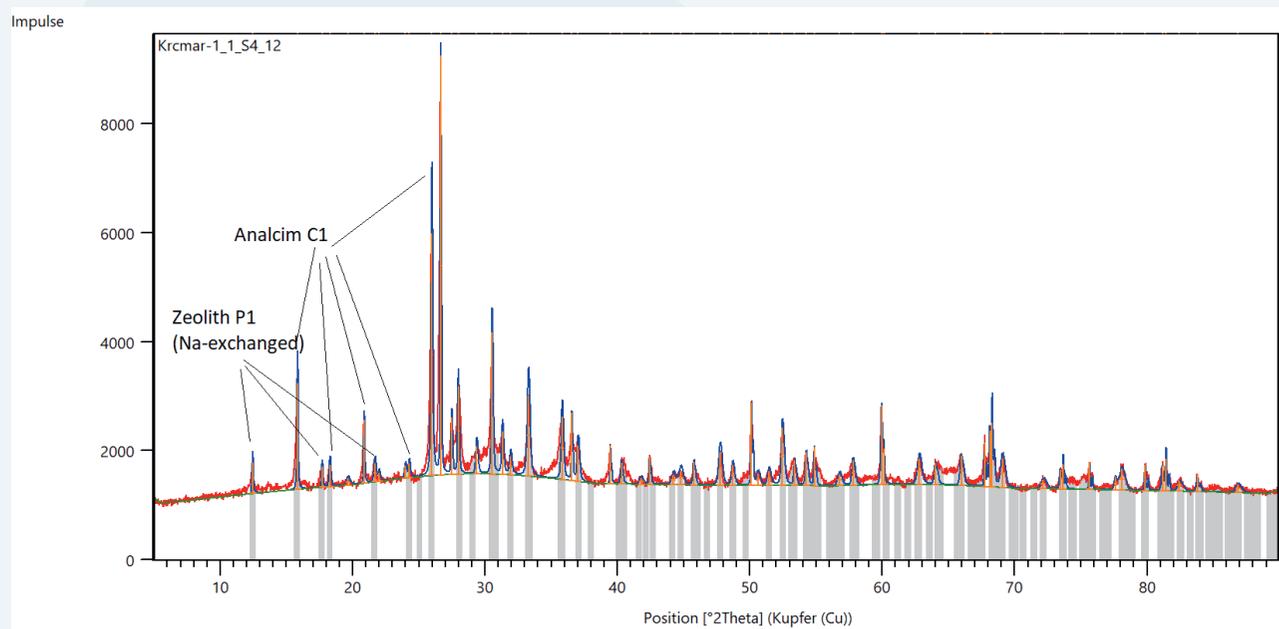


Abb. 19: XRD-Analyse der Zeolithe in Probe S4_12, die mit der besten Kombination der Reaktionsparameter synthetisiert wurde. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

Die durchgeführte Parameterstudie belegt die Machbarkeit, formstabile Zeolithe durch Hydrothermal-Synthese aus Geopolymeren bei geeigneten Reaktionsbedingungen zu gewinnen.

Die Einflüsse von Temperatur, Zeit und der verwendeten Laugenkonzentration können zumindest annähernd beantwortet werden. Unklar bleibt die Frage, wie sich unterschiedliche Geopolymer-Typen als Ausgangsmaterialien auf die Bildung bestimmter Zeolith-Typen auswirken. Weitere Studien mit einer größeren Anzahl chemisch bzw. mineralogisch unterschiedlich zusammengesetzter Geopolymer-Vorstufen wären eine Möglichkeit, diese Fragestellung zu klären.

Darüber hinaus sind weitere Studien nötig, um genau vorherzusagen zu können, welche Zeolith-Strukturen sich synthetisieren lassen. Die beste Kombination der Reaktionsparameter in dieser Forschungsarbeit, nämlich eine Reaktionszeit von 48 Stunden, eine Temperatur von 120 °C sowie eine Laugenkonzentration von 0,5 mol/l für die Hydrothermal-Synthese von Zeolithen, wird im weiteren Verlauf der Untersuchungen zur Herstellung einfacher geometrischer Hohlkörper verwendet. Die so synthetisierten Proben werden ebenfalls mittels XRD-Methodik analysiert (Abbildung 20).

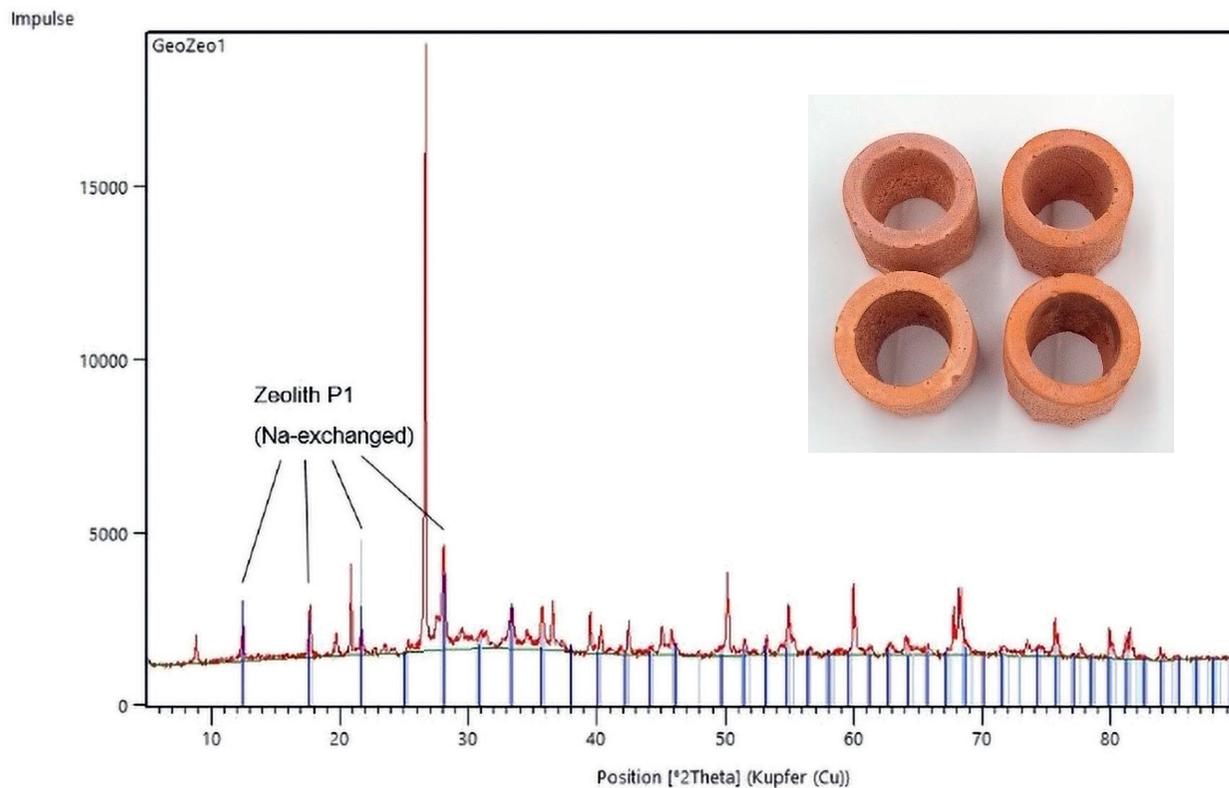
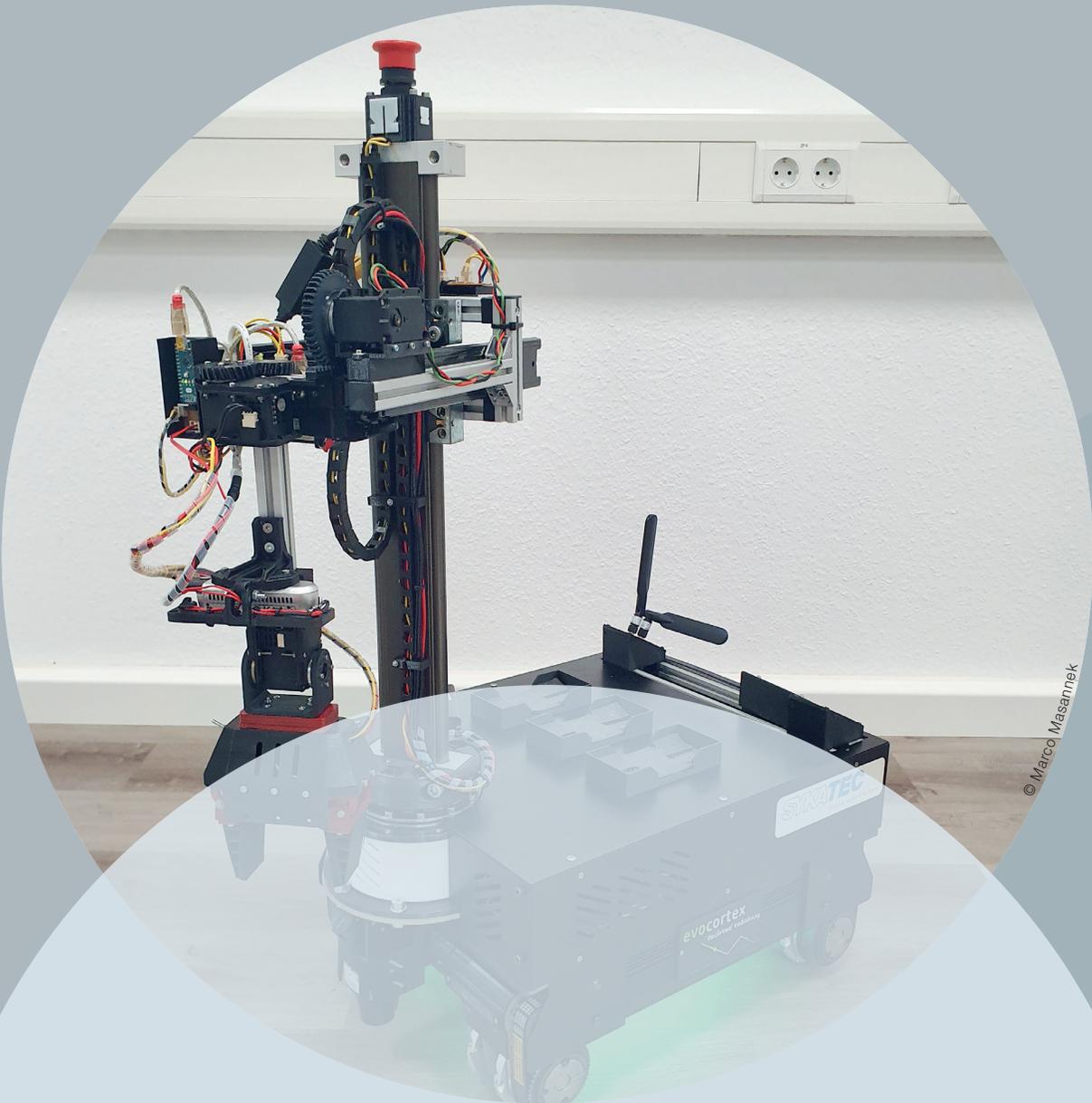


Abb. 20: XRD-Messung eines Zeolith-Hohlkörpers mit der Zusammensetzung S4_12. (Grafik: Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN)

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die hier vorgestellten Ergebnisse aus der THN-Vorlauftforschung dienen als Vorarbeiten für eine bereits genehmigte Projektskizze im Rahmen der „Strukturfördernden Verbundprojekte“ im Energie Campus Nürnberg. Der Vollartrag zu diesem dreijährigen Forschungsprojekt in Kooperation mit einer Arbeitsgruppe aus der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wird momentan verfasst und im Januar 2022 beim Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (StMWK) zur Förderung eingereicht. Im geplanten Projekt sollen Zeolithe durch Hydrothermal-Synthese aus Geopolymeren synthetisiert werden. Dabei erfolgt ein Up-Scaling der im Labor erarbeiteten Ergebnisse in den technischen Maßstab. Darüber hinaus wird die Möglichkeit zur Anwendung verschiedener Formgebungsverfahren wie 3-D-Druck, Extrusion sowie von Gießprozessen untersucht. Ziel des Projektes ist die nachhaltige Herstellung und Charakterisierung von zeolithischen Granulaten und Hohlkörperstrukturen aus Recycling-Materialien für die Anwendung in einem Sorptionsspeicher. Die so hergestellten Zeolithe werden im Rahmen der Forschungsaufgaben auch in einem Sorptionsspeicher auf ihre Wirksamkeit getestet und mit kommerziellen Referenzmaterialien verglichen.

Ein thermischer Sorptionsspeicher kann dazu dienen, die Diskrepanz zwischen Leistungsangebot und Leistungsnachfrage bei erneuerbaren Energien auszugleichen, z. B. in Form von Fernwärme oder für industrielle Heizprozesse, wie die Speisewasser-Vorwärmung. Der Einsatz von Recyclingmaterial bei der Geopolymer- bzw. Zeolith-Synthese führt zu einer vergleichsweise kostengünstigeren Zeolith-Produktion und trägt darüber hinaus zur Ressourcen-Effizienz durch Kreislaufwirtschaft und Umweltschutz bei. Auf diese Weise kann ein erheblicher Beitrag zur Unterstützung der Energiewende und zur Nachhaltigkeit geleistet werden. An einer wissenschaftlichen Veröffentlichung wird derzeit gearbeitet.



LitterPicker –

Entwicklung eines Verbundsystems für die Erkennung
und Beseitigung von Müll auf öffentlichen Straßen,
Fußwegen und in Parks

Prof. Dr. Stefan May

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

M. Sc. Marco Masannek

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Inhalt des Vorlaufforschungsprojektes „LitterPicker“ ist die Vertiefung von Wissen und Schaffung von Erfahrungen mit vollautonomen Robotern im öffentlichen Raum. Es stehen insbesondere die Identifikation und das Aufnehmen von Objekten in verschiedenen Umgebungen im Fokus. Darüber hinaus werden auch Problemstellungen für eine effiziente Multi-Roboter-Koordination untersucht. Auf Basis der Projektergebnisse sollen themenverwandte Forschungsanträge im Bereich der mobilen Robotik erarbeitet und eingereicht werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis September 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, Labor für mobile Robotik
Projektleitung	Prof. Dr. Stefan May
Kontaktdaten	stefan.may@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der Begriff „Smart Cities“ prägt viele Digitalisierungs-Projekte. Diese Vision über eine Innenstadt der Zukunft ist hochtechnisiert und wird durch Roboter und weitere Zukunftstechnologien ergonomischer und effizienter gemacht. Eine wichtige Anwendung ist die Beseitigung von Müll, der auf Straßen, Fußwegen und in Parkanlagen liegen gelassen wird. Es handelt sich hierbei größtenteils um Kleinstmüll, also z. B. Zigarettenstummel, Plastikflaschen und -verpackungen sowie Kronkorken. Heute eingesetzte Kehrmaschinen können Müll und Schmutz oft nicht vollständig beseitigen, da sie nicht auf Fußwegen und in Parks fahren, und die Bordsteinbereiche nur teilweise abdecken.

Dabei geht gerade von Kleinstmüll eine erhebliche Gefahr für die Umwelt aus. Ein einzelner Zigarettenstummel kann bei Regen in nur 30 Sekunden bis zu 40 Liter Grundwasser verunreinigen. Aber auch kleine Plastikteilchen, die in die Umwelt gelangen, können eine Gefahr für Lebewesen darstellen (z. B. durch Verschlucken).

Für dieses Problem soll ein Roboter-Verbundsystem entwickelt werden, welches verschiedene Müllarten erkennen und unterscheiden kann, um diese anschließend vollautonom mittels eines Greifers aufzusammeln.

Unser wissenschaftlicher Mitarbeiter, Marco Masannek, befasste sich während seines Forschungsmasterstudiums (M-APR) mit autonomer Robotik. Seine Masterarbeit schrieb er zum Thema „Entwicklung einer Roboterkontrollarchitektur für autonome mobile Roboter im industriellen Umfeld“. Der für diese Arbeit eingesetzte Roboter „OHMnibot“ ist mit verschiedenen Sensoren und Aktoren ausgestattet und so in der Lage, selbstständig verschiedene Positionen in einer definierten Umgebung anzufahren, dort nach Objekten zu suchen und diese zu greifen. Auf diese Vorarbeit konnte aufgebaut werden. „OHMnibot“ wurde deshalb zu einem Versuchsträger des vorliegenden Vorlaufforschungsprojektes. Da es sich bei dem Roboter zudem um den Wettkampfrobooter für die Robocup@Work-Liga handelt, konnten Teile der Forschungsschwerpunkte in studentischen Projekt- und Abschlussarbeiten abgebildet werden.

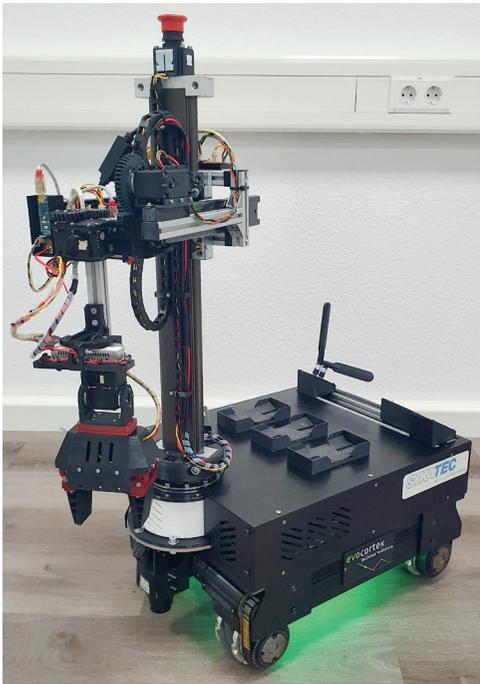


Abb. 1: Roboter „OHMnibot“ Bild: Marco Masannek

Mit Beteiligten eines weiteren parallel laufenden Projektes konnten aufgrund einer partiellen Themenverwandtschaft ebenso Entwicklungsergebnisse ausgetauscht werden. Dieses Projekt mit dem Namen „AutoPV“ setzt bei einem Arbeitspaket einen Schwerpunkt auf die Entwicklung von Methoden zur präzisen Outdoor-Lokalisierung. Ein Roboter bewegt sich autonom auf Grünflächen unterhalb von Solarpanelen. Diese Panele werden mittels Thermografie auf Defekte untersucht, während die Grünfläche gemäht wird.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Eine grobe Analyse im Vorfeld ergab, dass der Aufwand für die Entwicklung eines Müllsammelroboters so groß ist, dass ein oder mehrere Promotionen und/oder Abschlussarbeiten an diesem Thema durchgeführt werden können.

Im Vordergrund der Vorlauforschung stand daher die Ausarbeitung eines Forschungsantrags, um die finanziellen Mittel für ein solches Vorhaben sicherzustellen.

Folgende Schritte wurden innerhalb der Vorlauforschung durchgeführt:

- Analyse des Stands der Technik
- Erstellung einer Anforderungsanalyse
- Ausarbeitung eines ersten Projektkonzepts
- Definition von Forschungsschwerpunkten
- Literaturrecherche zu den Forschungsschwerpunkten
- Machbarkeitsstudien zu den Kernelementen des Konzepts

Die Erkenntnisse aus diesen Arbeitsschritten flossen in den Forschungsantrag ein, um in diesem die nötigen Arbeitspakete genauer zu definieren. Für die angestrebten Promotionen war es außerdem wichtig, thematische Schwerpunkte in den jeweiligen Forschungsbereichen zu bestimmen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Kooperation mit dem Institut Inria in Sophia Antipolis, Frankreich

Zusammen mit dem Institut Inria (Institut national de recherche en informatique et en automatique) in Sophia Antipolis wurde seit Anfang des Jahres 2021 an einem Forschungsantrag mit dem Namen „ATLANTIS“ (Artificial Intelligence for dangerous waste picking robots) gearbeitet. Ziel des Antrags ist die Finanzierung von drei Promotionsstellen und/oder Abschlussarbeiten, die alle thematisch bei einer oder mehreren der zuvor genannten Problemstellungen liegen. Die Kooperation erfolgt mit dem Team ACENTAURI (<https://team.inria.fr/acentaury/>).

Grundlage einer Ausarbeitung war unter anderem die Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zur Förderung von deutsch-französischen Projekten zum Thema Künstliche Intelligenz (https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2020/10/3205_bekanntmachung.html).

4.1 Analyse des Stands der Technik

Mit der groben Projektidee wurde zunächst der Markt auf aktuelle industrielle Lösungen untersucht. Dabei konnten verschiedene Produkte identifiziert werden, die ähnliche Aufgabengebiete aufweisen. Die Firma „Zenrobotics“ befasst sich z. B. mit der Identifizierung und dem Sortieren von bereits gesammeltem Müll in einer Sammelstelle, um die verschiedenen Materialien besser recyceln zu können (s. Abb. 2).

Das Münchner Start-up „Angsa Robotics“ entwickelt einen Müllsammelroboter (s. Abb. 3), der speziell für das Aufsammeln von kleinteiligen Müllobjekten (Zigarettenstummel, Kronkorken) aus unebenen Untergründen (Gras, Kies) konzipiert ist. Größere Objekte wie Flaschen oder Gesichtsmasken können jedoch nicht entfernt werden. Außerdem wird keine Karte der Umgebung erstellt, was Navigations- und Planungsaufgaben erschwert. Das Prime-Air-Projekt von Amazon befasst sich mit der automatischen Lieferung von kleineren Paketen mittels Multicoptern. Die Drohnen werden hierbei in einem Lager manuell beladen und navigieren anschließend mittels GPS autonom zur Zieladresse, wo das Paket abgelegt bzw. „abgeworfen“ wird.

4.2 Erstellung einer Anforderungsanalyse

Basierend auf der Analyse des Stands der Technik und den Erfahrungen aus den Projekten „OHMnibot“ und „AutoPV“, wurden für verschiedene Herausforderungen, die bei der Entwicklung eines Müllsammelroboters bzw. dessen Infrastruktur auftreten können, mögliche Lösungen analysiert und gegenübergestellt.

Auswahl einer geeigneten Fahrzeugkinematik

Fahrzeuge im öffentlichen Raum sind meist mit der sogenannten „Ackermann“-Lenkung ausgestattet. Dabei handelt es sich um das klassische Fahrwerk eines Pkws mit einer Lenk- und einer starren Hinterachse. Diese Kinematik ist zwar für höhere Geschwindigkeiten gut geeignet, das Rangieren (z. B. beim Parken) ist jedoch platzintensiv und umständlich.

Eine Panzerlenkung (häufig eingesetzt bei Baustellen- oder militärischen Fahrzeugen) ermöglicht die Rotation der Plattform auf der Stelle, wodurch die autonome Pfadfindung erleichtert wird. Gleichzeitig wird jedoch ein großes Drehmoment des Antriebs benötigt. Im Gegensatz zum Abrollen eines Rades, sind die Kräfte bei diesem Antriebskonzept ungleich höher, um Reibungskräfte zwischen Rädern/Ketten und Boden beim Drehen zu überwinden. Zudem sind, je nach Einsatzgebiet, entweder Räder (Straße) oder Ketten (Gelände) für eine optimale Traktion sinnvoll. Da der Roboter sowohl Straßen als auch Parks säubern können soll, müssen Vor- und Nachteile einer konkreten Ausprägung gegeneinander abgewogen werden.

Nimmt man sich ein Beispiel am bestehenden System (Menschen mit Greifzange), so kommt auch ein humanoides Design infrage. Hierbei muss jedoch die aufwendige Regelung der Gelenke berücksichtigt werden, die aktuell noch nicht für jede Anwendung ausgereift ist.

Lokalisierung und Orientierung in der Umgebung

Damit ein Roboter zielstrebig verschiedene Müllansammlungen anfahren kann, muss er sich in seiner Umgebung zurechtfinden können. Hierfür muss zunächst eine Karte der Umgebung erstellt werden, die sowohl sensorische als auch semantische Informationen beinhaltet (Aussehen und Bedeutung von z. B. einer Straße, Müll-eimer, usw.). In dieser Karte muss der Roboter sich dann robust lokalisieren können, auch wenn sich die äußere Erscheinung durch z. B. Witterung oder Jahreszeiten ändert.

Außerdem müssen bei der autonomen Navigation sowohl statische (z. B. abgestellte Fahrräder) als auch dynamische Hindernisse (Menschen, Tiere, fahrende Autos, etc.) sicher umfahren werden. Dabei ist es enorm wichtig, dass der Roboter kein Risiko für Menschen darstellt, indem er z. B. unvermittelt in den Straßenverkehr eingreift.

Identifikation von (Müll-)Objekten

Damit der Roboter den Müll überhaupt aufsammeln kann, muss dieser zunächst als solcher identifiziert werden. Hierfür kommen verschiedene Methoden der Bildverarbeitung infrage, die jedoch spezielle Stärken und Schwächen haben.

Klassische, modellbasierte Methoden können zwar unter idealen Bedingungen sehr gute Erkennungsraten produzieren, liefern jedoch bei optischen Veränderungen des Objekts und/oder des Hintergrunds keine sinnvollen Ergebnisse mehr. Sie kommen daher eher nicht infrage, da Müll teilweise extremer Witterung ausgesetzt ist, wodurch das Objekt verformt und verschmutzt wird. Die Umgebung kann zudem sehr unterschiedlich ausgeprägt sein (Fußweg, Gras, Erde, Kies, etc.).

Für solche Anwendungen sind neuronale Netze sinnvoll. Diese sind datengetrieben und daher auch für Szenen mit hoher Varianz geeignet. Der Nachteil hierbei ist die aufwendige Datenakquise, bei der oftmals Realbilder händisch annotiert werden müssen. Da die benötigten Datensätze häufig aus mehreren Zehntausend Bildern bestehen, kann der Prozess der händischen Datengenerierung in Abhängigkeit von der Personalkapazität auch mehrere Wochen andauern.

Lokalisierung und Manipulation von Müllobjekten

Nach der erfolgreichen Identifikation eines Müllobjekts muss von den 2-D-Kamerabildern noch auf die 3-D-Pose des Mülls geschlossen werden, damit das Objekt in der Realwelt gegriffen werden kann.

Dies muss einerseits relativ zum Roboter geschehen, damit dieser möglichst genau die tatsächliche Pose anfahren kann. Damit jedoch auch Müll, der womöglich gerade nicht gegriffen werden kann (unerreichbar, Beutel voll), zu einem späteren Zeitpunkt behandelt werden kann, muss auch die aktuelle Roboterpose mitberücksichtigt werden, um diese Müllobjekte in einer Datenbank zu speichern.

Damit Objekte sofort gegriffen werden können, muss der Roboter mit einem Roboterarm und Greifer ausgestattet sein. Die Herausforderungen für den Arm sind z. B. die benötigte Positioniergenauigkeit, Reichweite und Traglast für verschiedene Objekte. Glasflaschen sind z. B. deutlich schwerer als Zigarettenstummel und dadurch auch eine größere Belastung für den Arm. Dafür sind kleine Objekte (z. B. Kronkorken) schwer aufzuheben, vor allem, wenn diese auf einer Grasfläche liegen.

Datenbank und Multi-Roboter-Koordination

Damit Reinigungszyklen auch langfristig geplant werden können, muss eine Datenbank angelegt werden, in der z. B. die Arten und die Menge von Müll für verschiedene Orte gespeichert werden. Damit können Reinigungsintervalle effizient ausgelegt und die Anzahl der benötigten Roboter bestimmt werden.

Für die Reinigung von großen Flächen, z. B. einem Park nach einer Veranstaltung, kann es dann durchaus notwendig sein, mehrere Roboter einzusetzen, um die Reinigungszeit in einem annehmbaren Rahmen zu halten. Es kann auch der Einsatz mehrerer Robotertypen sinnvoll sein, z. B. in Kombination mit einer Kameradrohne, die das Gebiet zunächst überfliegt und sich somit einen Überblick verschafft. Die Koordination und Datensynchronisierung all dieser Roboter sind für einen reibungslosen Ablauf essenziell, da die Roboter sonst z. B. gleichzeitig versuchen würden, denselben Müll aufzuheben.

4.3 Ausarbeitung der ersten Projektskizze für „ATLANTIS“

In den ersten Monaten wurde eine Projektskizze für die Müllbeseitigung im öffentlichen Raum erstellt. Der Fokus lag dabei unter anderem auch auf medizinischen Gesichtsmasken, die aufgrund der potenziellen Virenbelastung ein Gesundheitsrisiko für Servicekräfte in der Müllbeseitigung darstellen können.

Das Konzept beinhaltet den Einsatz von sowohl Boden- als auch Luftrobotern, um eine schnelle und effiziente Reinigung einer Fläche zu ermöglichen. Als Chassis für den Bodenroboter soll der panzergelenkte Roboter „KIWI“ aus dem Projekt „AutoPV“ eingesetzt werden, auf dem zusätzlich ein Roboterarm, verschiedene Sensoren (3-D-Kameras, LiDARs) und ein Behälter für gesammelten Müll angebracht werden, der gleichzeitig als Landeplattform für die Drohnen dient (s. Abb. 5). Von diesen sollen mehrere Exemplare eingesetzt werden, um sich zunächst einen Überblick der Umgebung zu schaffen, eine Karte für die Bodennavigation zu erstellen und außerdem erste Müllobjekte zu identifizieren.

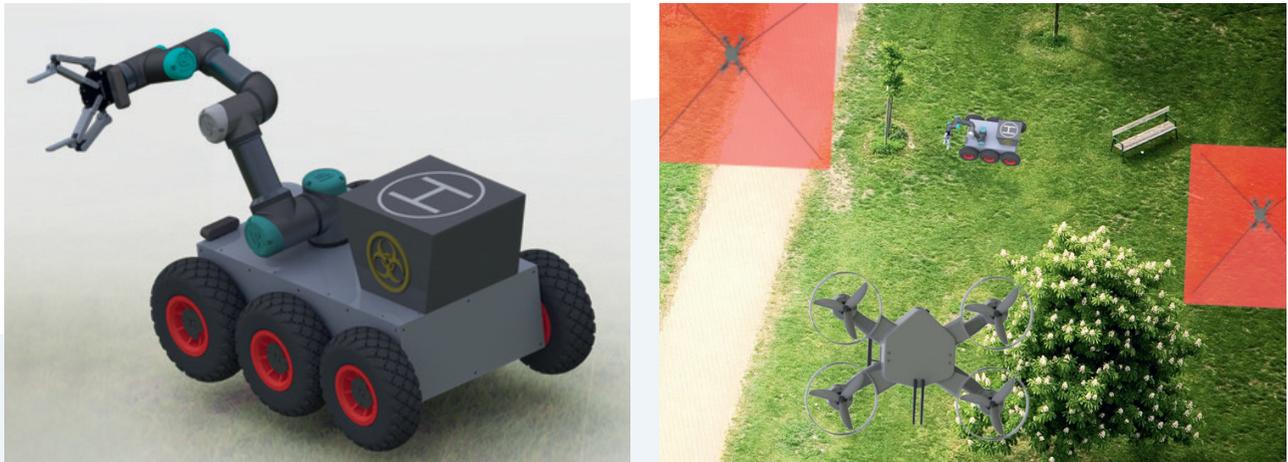


Abb. 2: Erstes Roboterkonzept für „ATLANTIS“ Bild: Marcus Fenn

Damit die einzelnen Roboter auch Daten von anderen Systemteilnehmern verarbeiten und nutzen können, soll eine zentrale Datenbank entwickelt werden, auf die die Luft- und Bodenroboter zugreifen können. In dieser soll eine gemeinsam nutzbare Umgebungskarte gespeichert werden, die zudem die Position und den Erkennungszeitpunkt von Müllobjekten beinhaltet. Dadurch kann, neben dem Erkenntnisgewinn über das Müllaufkommen und die Art der Objekte, ein Reinigungszyklus für die Sammelroboter geplant werden.



Abb. 3: Datenbankkonzept für „ATLANTIS“ Bild: Marco Masannek

Durch diese zentrale Datensammlung kann außerdem die Identifikation des Mülls stetig verbessert werden, da stetig neue Szenen und Daten analysiert werden können. Um außerdem Bürgern eine Möglichkeit zu geben, an der Verbesserung des Systems und zudem an der Reinigung der eigenen Stadt teilzunehmen, soll eine App entwickelt werden, mit der Fotos von Müll aufgenommen und ebenfalls an die Datenbank geschickt werden können. Dadurch werden auch Objekte erfasst, an denen kein Roboter zuvor vorbeigefahren/-geflogen ist. Außerdem soll eine Möglichkeit in die App integriert werden, auch die Art des Mülls im Bild zu markieren, wodurch zusätzliche Datensätze für das Training von neuronalen Netzen gewonnen werden können.

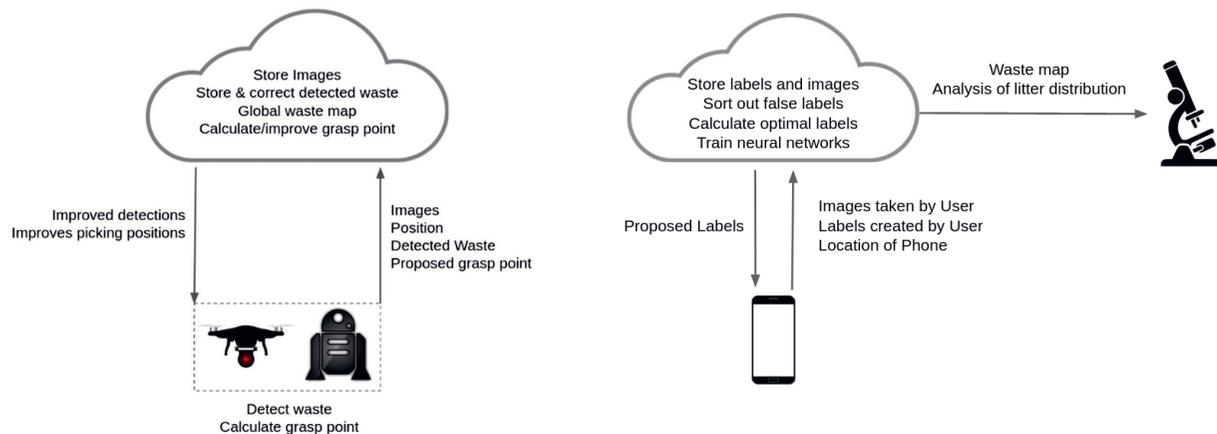


Abb. 4: Konzept zur Verbesserung der Objekterkennung und Bürgerinteraktion Bild: Sally Zeitler

4.4 Definition von Forschungsschwerpunkten und Literaturrecherche

Mit der beschlossenen Projektskizze konnte mit der Literaturrecherche zu Forschungsgebieten und möglichen Promotionsthemen begonnen werden. Es wurden vier wissenschaftliche Schwerpunkte identifiziert:

■ Müllerkennung:

Der Stand der Technik sieht neuronale Netze für die Erkennung von Objekten auf verschiedenen Oberflächen vor. Die Akquise von geeigneten (sehr großen) Datensätzen für das Training solcher Netze ist jedoch meist ein Problem, da es wenige öffentliche Datensätze hierfür gibt. Neben der Möglichkeit zur Bürgerinteraktion soll daher eine Möglichkeit erforscht werden, solche Datensätze synthetisch mithilfe von 3-D-Simulationsumgebungen zu generieren. Dabei liegt der Fokus auf verformbaren Objekten (Plastikflasche, Gesichtsmaske, etc.).

■ Kartenerstellung und -aktualisierung:

Der kooperative Einsatz von Luft- und Bodenrobotern erfordert ein hybrides Kartenmodell, das die Integration von Daten aus verschiedenen Perspektiven erlaubt. Zudem müssen nicht nur geologische Eigenschaften wie Straßen, Treppen, Untergründe, usw. berücksichtigt werden, sondern auch eine geeignete Methode für die Einbettung der semantischen Mülldaten gefunden werden, damit die Karte für die Müllplanung genutzt werden kann. Es muss zusätzlich eine Möglichkeit geboten werden, die Datenbasis im Jahreszeitenverlauf zu aktualisieren (optische Veränderung der Umgebung), damit die Karte nicht jedes Mal neu erstellt werden muss.

■ Multi-Roboter-Aufgabenplanung:

Um die Einsatzzeit der Roboter zu minimieren, müssen optimale Trajektorien für die Reinigungszyklen gefunden werden. Diese Problemstellung wird zusätzlich verstärkt, wenn Faktoren wie Batterieladestatus, die individuellen Roboterfähigkeiten und dessen aktuelle Pose mit einbezogen werden sollen. Da es zudem für die meisten Anwendungsfälle eine Roboterflotte, bestehend aus Luft- und Bodenrobotern, benötigt, müssen jeweils individuelle Trajektorien geplant und optimiert werden. Bei diesem rechenaufwendigen Problem vergrößert die Anzahl an berücksichtigbaren Faktoren die Rechenzeit exponentiell, weshalb simple Brute-Force-Algorithmen nicht infrage kommen. Hierzu muss ein geeigneter Algorithmus gefunden werden, der in akzeptabler Rechenzeit ein sinnvolles Ergebnis liefern kann.

■ Greifen von Müllgegenständen:

Damit Müllgegenstände gegriffen werden können, müssen Roboter in der Lage sein, sich in einer Umgebung für andere Lebewesen risikofrei zu bewegen. Das Greifen des Mülls muss aus unterschiedlichen Posen möglich sein. Vorgesehen ist für die Greifstrategien ein dynamisch lernendes neuronales Netz, das sich während der Anwendung optimiert.

4.5 Machbarkeitsstudien und prototypische Umsetzungen

Feldtests mit „OHMnibot“

Die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche wurden, sofern möglich, am Referenzsystem „OHMnibot“ als prototypische Implementierung umgesetzt, um Erfahrungen in den jeweiligen Feldern zu sammeln. Hierzu wurde im Rahmen der RoboCup@Work-Liga erprobt, inwiefern die Erkennung und das Greifen bekannter, starrer Objekte von verschiedenen Untergründen möglich ist. Hierbei war vor allem der eingesetzte Kunstrasen (vgl. Abb. 8) erkenntnisreich, da die Objekte darin je nach Form und Gewicht einsinken können, was unter Umständen eine Art „Graben“ bzw. „Stochern“ des Greifers erfordern würde, um die Objekte sicher aufzunehmen. Da eines der Hauptanwendungsgebiete von Müllsammelrobotern ein Einsatz in Parkanlagen ist, ist diese Erkenntnis besonders wertvoll für die Planung der Greifermechanik.



Abb. 5: @Work-Objekte auf Kunstrasen Bild: Marco Masannek

Eine andere positive Erkenntnis aus der Teilnahme an der virtuellen RoboCup@Work-WM-2021 war, dass neuronale Netze mit synthetischen Daten gewinnbringend für das Training augmentiert werden können. Mit einem Verhältnis von etwa 1:20 zwischen realen und simulierten Trainingsdaten (s. Abb. 10), war es möglich, ein Erkennungssystem zu entwickeln, welches die Objekte in etwa 4 von 5 Fällen richtig erkennt. Beachtlich war zudem, dass auch sehr kontrastarme Szenen erfolgreich klassifiziert werden. So wurden beispielsweise auch silberne Ringe auf einer Oberfläche aus Alufolie (s. Abb. 11) erkannt. Die durchsichtigen Oberflächen (Plexiglas) bewiesen jedoch auch, dass bei einer vollautonomen Manipulation die Präzision der Erkennung eine wesentliche Rolle spielt. So kam es trotz der standardisierten Tischhöhen und der ebenen Arena ohne Höhenänderungen zu Kollisionen des Greifers mit der Oberfläche, was zu Beschädigungen des Roboters und/oder zu Misserfolgen beim Greifen führte.

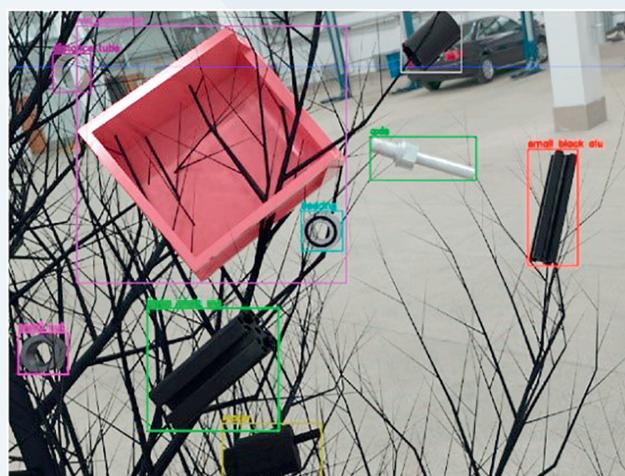


Abb. 6: Synthetische Trainingsdaten für @Work-Objekte Bild: Sally Zeitler

Ein Forschungsschwerpunkt der @Work-Liga ist außerdem die vollautonome Planung und Ausführung von Arbeitsschritten, die für die Abarbeitung einer vordefinierten Aufgabenliste notwendig sind. Hierfür wurde die Software-Kontroll-Architektur, die bereits Thema der Masterarbeit von Marco Masannek (SoSe 2021) war, weiterentwickelt und erprobt. Dabei wurden verschiedene Planungsalgorithmen (Greedy, Evolutional) implementiert und getestet, wodurch die Rechenzeit für die Planung deutlich optimiert werden konnte. Es stellte sich jedoch heraus, dass die verwendeten Algorithmen trotzdem noch eine, mit wachsender Anzahl von Aufgaben, exponentiell steigende Rechenzeit benötigen, was grundsätzliche Überlegungen zur Multi-Roboter-Aufgabenplanung zur Folge hatte. So kamen z. B. Themen zu Cloud-Computing, dezentraler Aufgabenplanung und biologisch inspirierten Algorithmen (Bienen-/Ameisenkolonien) auf.



Abb. 7: Verschiedene getestete Oberflächen in der @Work-Liga Bild: Marco Masannek

Experimente mit Multicoptern

Im Sommer 2021 wurden Testflüge mit einer Kameradrohne des Marktführers „DJI“ an der Wöhrder Wiese ausgeführt, um zu überprüfen, ob die geplante Umgebungsanalyse mit Luftrobotern überhaupt sinnvoll ist. Dabei stellte sich heraus, dass das verwendete Drohnensystem zwar für die Kartierung von geologischen Eigenschaften geeignet ist, jedoch eher schlecht für die Erkennung von Müllobjekten, da diese durch die Kameraoptik aus einer sinnvollen Arbeitshöhe (Sichtbereich, Abstand zu Boden und Hindernissen) zu klein abgebildet werden. Im Anschluss wurden Kalkulationen zur Bildauflösung, zu erlaubten Flughöhen, Linsengeometrien, Bildraten und maximaler Fluggeschwindigkeit verschiedener auf dem Markt verfügbarer Drohnenmodelle angestoßen. Die Erkenntnis hieraus ist, dass Systeme mit einem variablen optischen Zoom auch für eine grobe Klassifizierung eingesetzt werden können. Auf die Umsetzung dieser Ziele fokussiert sich zukünftig der Forschungspartner Inria.

Teilnahme an der SciRoc Challenge 2021 „Episode 5: Shopping Pick & Pack“

Um mehr Erfahrungen über die Herausforderungen von Robotern in Smart Cities zu sammeln, nahm das Team AutonOHM@Work unter der Leitung von Marco Masannek an der SciRoc Challenge 2021 in Bologna, Italien, teil. Die „Episode 5: Shopping Pick & Pack“ hat das Ziel, mit einem Roboter eine Kiste mit Produkten zu leeren und diese in die entsprechenden Regale einzuräumen. Für dieses Aufstocken von Supermarktregalen mussten verschiedene Anpassungen an der Software des Roboters OHMnibot vorgenommen werden. So war es beispielsweise bisher nicht vorgesehen, vor der Durchführung der Manipulationsaufgaben benachbarte Bereiche zu erkunden. Das Erstellen von Karten und die Manipulation von Objekten mussten damit simultan erfolgen. Dies erforderte Anpassungen in der Software-Kontroll-Architektur, die das System auch langfristig erweitern. Außerdem musste die gesamte Objekterkennung auf die neuen Objekte (Supermarktprodukte, s. Abb. 6) angepasst werden. Die Herausforderung bestand hierbei zudem darin, dass einige Produkte verformbar waren (Pakete mit Kaffeebohnen oder Reis). Zur Lösung dieses Problems wurde ein Ansatz gewählt, der ausschließlich synthetische Trainingsdaten verarbeitet. Problematisch war allerdings, dass für diese Produkte keine 3-D-Modelle verfügbar sind. Daher wurde mit verschiedenen Methoden versucht, passende Modelle selbst zu generieren, darunter auch die Erfassung repräsentativer realer Objekte mittels eines günstigen 3-D-Scanners. Dieser Ansatz

führte nur zu einem Teilerfolg, da die Objekte eine zu hohe Varianz in ihrer konkreten geometrischen Form besitzen. Kaffee- und Reispackungen sind beispielsweise nach dem Greifen und Platzieren durch Menschenhand meist eher sanduhr- als quaderförmig.



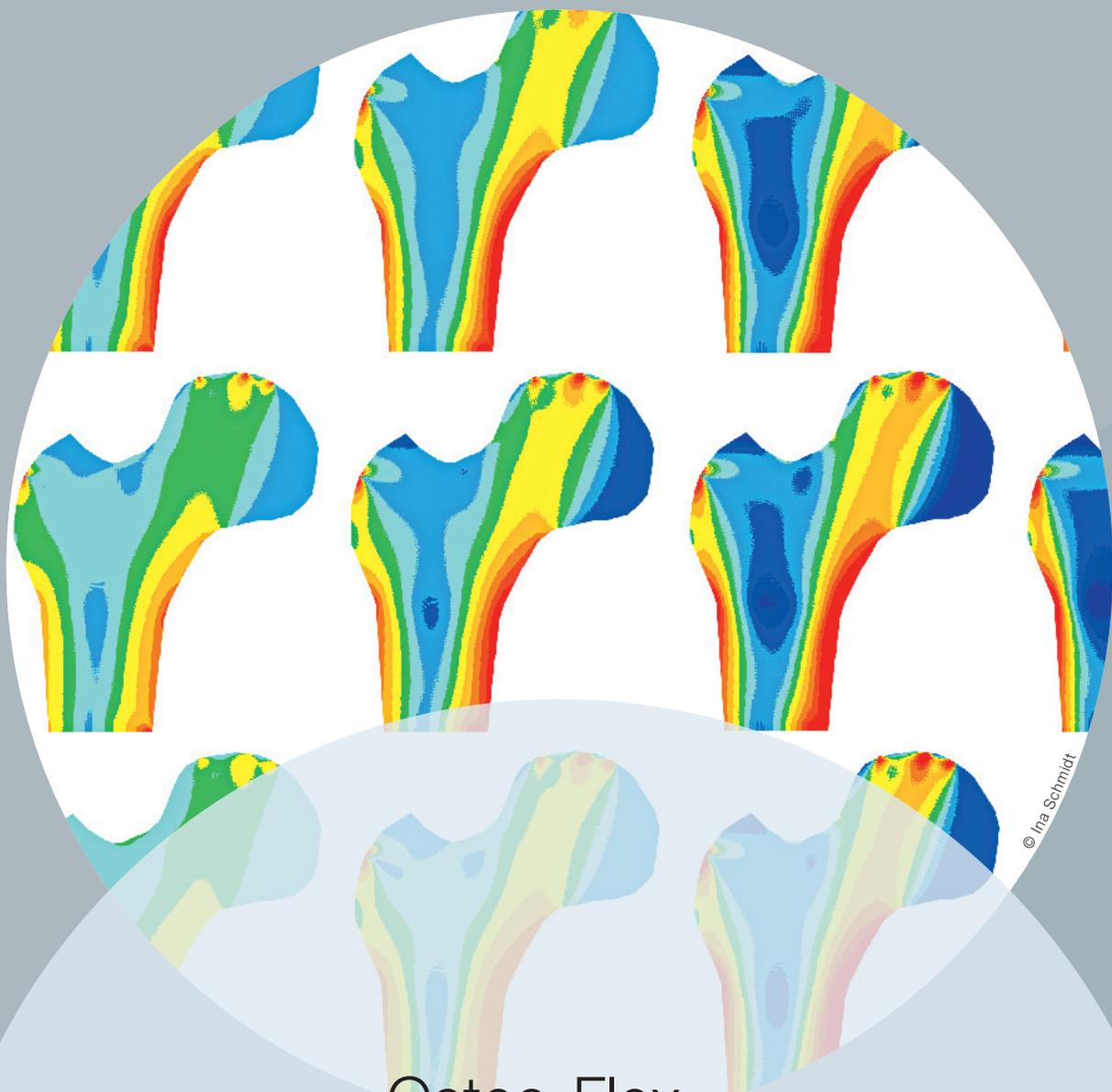
Abb. 8: Supermarktprodukte der SciRoc Challenge 2021 Bild: Sally Zeitler

Dies hatte auch zur Folge, dass die Greifpunktberechnungen oft unpassend waren und deshalb Greifversuche fehlschlugen. Auch das Verformen des granularen Inhalts der Pakete durch eine Lageänderung erzeugte Probleme: Die Lasterkennung des Greifers verhinderte das weitere Zufahren der Greiferbacken ab dem Erreichen eines Schwellwerts für die Kraft. Fehlte im Anschluss an das Anheben der Gegendruck der Auflagefläche, wurde das enthaltene Granulat anders verteilt. Diese Objekte rutschten anschließend aus dem Greifer. Zusätzlich fiel auf, dass die starken Größenunterschiede der Objekte und deren teilweise stark versetzten Schwerpunkte (Flüssigkeiten in Flaschen) unterschiedliche Greifstrategien erforderlich machten. Beim Einsortieren ins Regal stieß beispielsweise, je nach Präzision beim Greifen, ein Teil der Flasche am Regalboden an, wodurch hohe Belastungen an Greifer und Arm entstanden. Übertragen auf das Ablegen von Müll in die Behälter auf dem Roboterrücken, könnte dies zu Beschädigungen des Roboters im autonomen Betrieb führen.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die Erkenntnisse zu den Herausforderungen beim Greifen, der Outdoor-Navigation, dem Einsatz von Drohnen und dem Aufwand zur Eigenentwicklung bzw. die Anschaffungskosten von Robotern führten letztendlich zu dem Entschluss, dass man das geplante Projektvolumen aufteilt, um Projektanträge bei themenspezifischen Ausschreibungen besser platzieren zu können. Der erste Antrag fokussiert sich auf den Forschungsansatz zur Generierung augmentierter Trainingsdaten für deformierbare Objekte.

Das Projektvorhaben trägt den Titel ATLANTIS (Artificial inTelLigence for deformAble object IdeNtification and localizaTIon with autonomouS robot). Der Beitrag des Projektpartners Inria ist der Aufbau und die Aktualisierung einer Langzeitdarstellung komplexer und dynamischer Umgebungen mithilfe heterogener Sensoren. Die Einreichung ist im Frühjahr 2022 geplant.



Osteo-Flex – Flexoelektrizitätunterstützte Knochenheilung

Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Anna Titlbach, M. Sc.

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Ina Schmidt, M. Sc.

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Verschiedene Mechanismen und Prozesse tragen dazu bei, dass Knochenfrakturen heilen. Das sogenannte Remodelling bezeichnet Knochenumbauprozesse, bei denen, unter anderem bedingt durch stärkere mechanische Belastungen, die Knochendichte zunimmt. Unter einer inhomogenen Deformation, wie z. B. Biegung, erzeugen Knochen, insbesondere an Mikrofrakturen, eine elektrische Antwort und es wird davon ausgegangen, dass dieses elektromechanische Verhalten für die Heilungs- und Remodellierungseigenschaften des Knochens von wesentlicher Bedeutung ist. Der Ursprung dieser Reaktion wird der Flexoelektrizität von Kollagen, dem wichtigsten Strukturprotein der Knochen, zugeschrieben. Die Rolle des elektromechanischen Phänomens während des Knochenheilungsprozesses soll untersucht werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Mai bis Dezember 2021
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Maschinenbau und Versorgungstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou
Kontaktdaten	areti.papastavrou@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Trotz der bereits großen Fortschritte in Medizin und Wissenschaft gibt es im Verständnis der Anpassungs- und Regenerationsprozesse beim menschlichen Körper immer noch viele offene Fragen. Daher sind auch Vorhersagen bezüglich des Heilungsverlaufes von Knochenfrakturen im individuellen Fall bislang sehr schwierig. Der menschliche Knochen stellt ein lebendes und komplexes Material (Abb. 1) dar, welches vielfältigen Einflüssen und Belastungen ausgesetzt ist. Verschiedene Mechanismen und Prozesse tragen dazu bei, dass Knochenfrakturen heilen. So ist das sogenannte Remodelling ein wesentlicher Knochenumbauprozess, bei dem, bedingt durch u. a. mechanischen Stimulus, die Knochendichte zunimmt. Unter inhomogener Deformation, wie z. B. Biegung, erzeugen Knochen eine elektrische Antwort und es wird davon ausgegangen, dass dieses elektromechanische Verhalten für die Heilungs- und Remodellierungseigenschaften des Knochens von wesentlicher Bedeutung ist. Der Ursprung dieser Reaktion wird der Flexoelektrizität von Kollagen, dem wichtigsten Strukturprotein der Knochen, zugeschrieben. Theoretisch kann jedes Material dank dieser als Flexoelektrizität bezeichneten Eigenschaft elektrische Spannungen als Reaktion auf Dehnungsgradienten erzeugen.

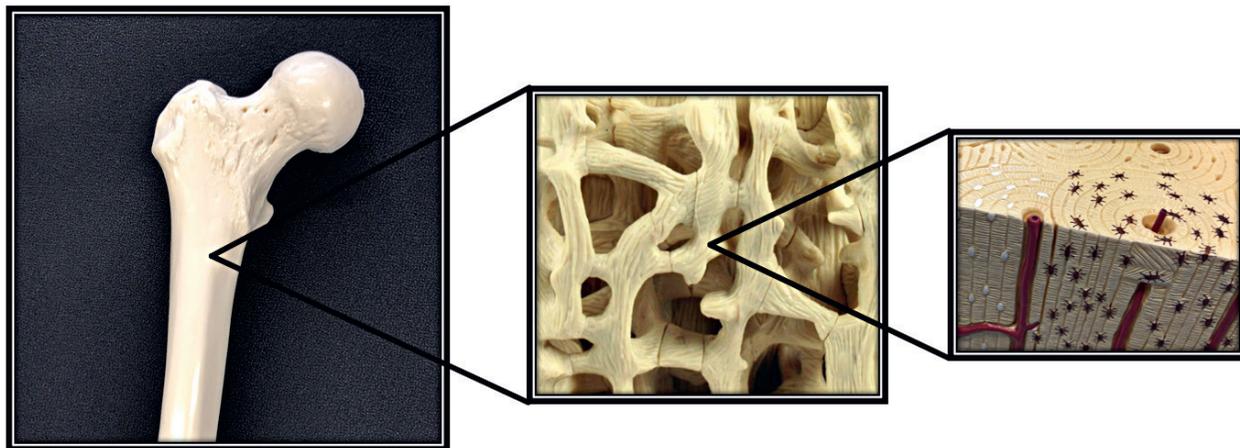


Abb. 1: Makro-, Meso- und Mikroskalen-Betrachtung des Knochens (Bild: Areti Papastavrou, Ina Schmidt)

In der materialwissenschaftlichen Arbeit von Vasquez-Sancho et al. [1] wurde erstmals die Flexoelektrizität von Knochen und reinem Knochenmineral (Hydroxylapatit) gemessen und festgestellt, dass diese in der gleichen Größenordnung liegen. Diese Beobachtung legt nahe, dass die Hydroxylapatit-Flexoelektrizität die Hauptquelle der biegeinduzierten Polarisation in kortikalen Knochen ist. Zur Berechnung der (flexo)elektrischen Felder, die durch Risse im Knochenmineral erzeugt werden (Abb. 2), werden gemessene flexoelektrische Koeffizienten verwendet. Die in [1] erzielten Ergebnisse bedeuten, dass die durch die Risse erzeugte Flexoelektrizität theoretisch groß genug ist, um die Osteozyten-Apoptose zu induzieren und so den Rissheilungsprozess einzuleiten.

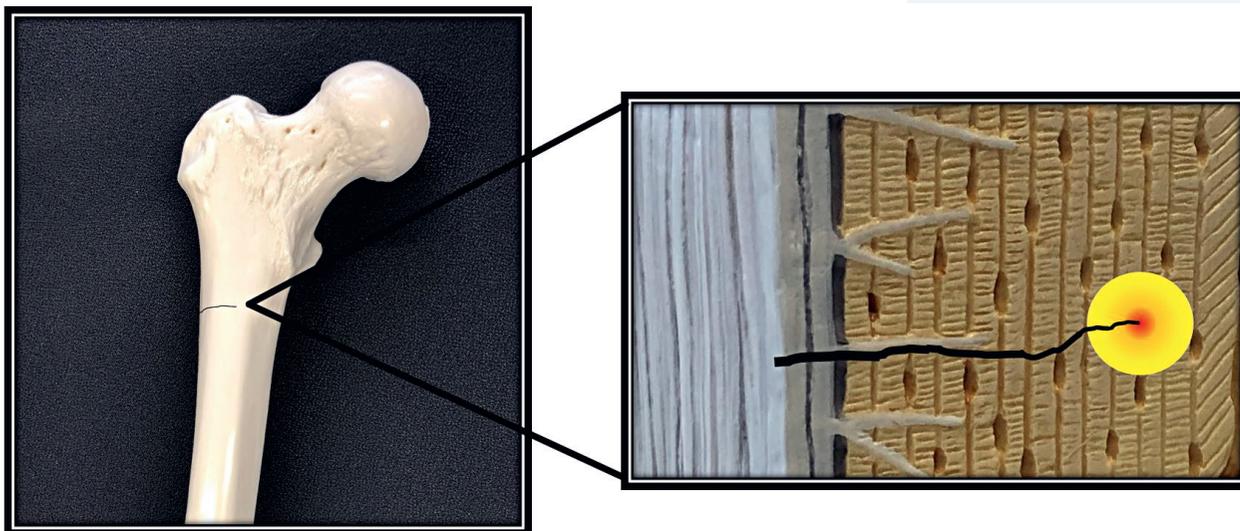


Abb. 2: Frakturspitze, Stelle größter Verzerrungsgradienten bzw. Flexoelektrizität (Bild: Areti Papastavrou, Ina Schmidt)

Die zentrale Rolle der Flexoelektrizität beim Knochenumbau als apoptotischer Auslöser des Reparaturprotokoll und als Elektrostimulation der Knochen aufbauenden Aktivität der Osteoblasten wurde von Núñez-Toldrà et al. [2] jüngst untermauert. Bislang ist noch nicht eingehender untersucht worden, inwiefern diese elektrische Stimulation des Knochens die Heilung von Rissen/Brüchen beschleunigt und ob bzw. wie diese von außen aktiviert werden kann. Eine numerische Simulation des Phänomens steht derzeit noch aus und könnte die Möglichkeit zur Entwicklung neuartiger Therapieansätze eröffnen. Interessant ist der Stimulus der Flexoelektrizität insbesondere auch vor dem Hintergrund der zunehmenden Zahl von Knochenimplantaten. Diese führen ebenfalls zu singulären Flächen und Verformungsgradienten im Knochen und bergen Risiken von ungenügendem Einwachsen, Lockerung und totalem Versagen. Eine Prognose des Anwachsverhaltens eines Implantats unter den gegebenen patientenspezifischen Gegebenheiten wäre im klinischen Alltag wünschenswert.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Forschungsprojekt soll die Flexoelektrizität, die durch die Kopplung des Gradienten der Verformung und der elektrischen Polarisation in einem dielektrischen Material gekennzeichnet ist, für Knochen implementiert und in Simulationen realisiert werden. Der kürzlich von McBride et al. [3] vorgestellte neuartige mikromorphe Ansatz, welcher die resultierenden Gradientenbeiträge höherer Ordnung, die bei hochgradig (materiell und geometrisch) nichtlinearen und (mechanisch, elektrisch und mikromorph) gekoppelten Problemen auftreten, soll in einer klassischen Finite-Elemente-Umgebung berücksichtigt und in das unter Mitwirkung der Projektleiterin formulierte Modell des Knochenremodellings integriert werden.

In der biomechanischen Forschungsgruppe um Prof. Papastavrou wurde bereits eine Formulierung des Remodellings auf der Makroebene implementiert, in welcher neben dem mechanischen Stimulus stochastische Effekte bei der Verteilung und Entwicklung der Dichte, der Einfluss des Alters [4] und der Einfluss der Verfügbarkeit von Nährstoffen auf die Entwicklung der Knochendichte [5] berücksichtigt werden, siehe Abb. 3. In einem anderen aktuell laufenden Projekt werden Konzepte für die Darstellung der trabekulären Struktur des Knochens auf der Mesoskala, siehe Abb. 1, getestet und implementiert. Eine Fachwerkstruktur wird auf der Basis der aufgebrachten Lasten optimiert und anschließend homogenisiert und auf die Makroskala übertragen.

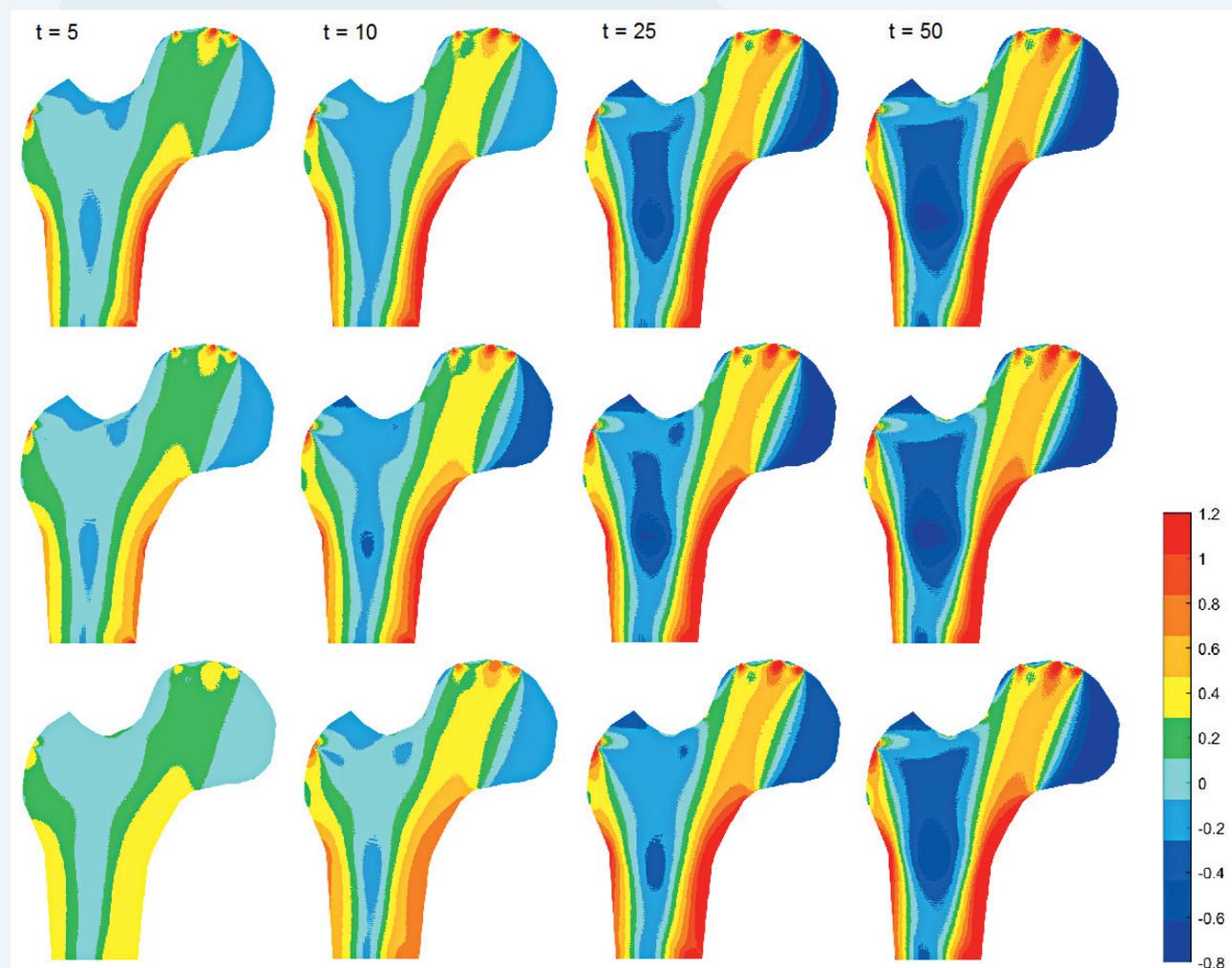


Abb. 3: Bezogene relative Dichteverteilung unter Berücksichtigung der Beschränkung der Verfügbarkeit (von oben nach unten: ausreichende, reduzierte und ausgeschöpfte Verfügbarkeit über die Zeit) [5] (Bild: Ina Schmidt)

Das Projekt Osteo-Flex dient dazu, die Mikroskala in das Modell miteinzubeziehen und durch die Berücksichtigung der Flexoelektrizität die Grundlagen für die Betrachtung von strukturellen Singularitäten und Verformungsgradienten. Damit soll die Simulation der Heilung von Knochen(an)brüchen bzw. des Anwachsverhaltens von Implantaten ermöglicht werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Forschungsprojekt Osteo-Flex erfolgte zunächst eine Betrachtung des primären Knochenheilungsprozesses, aufbauend auf dem bereits vorhandenen makroskopischen kontinuumsbasierten Modell für Knochenumbauprozesse. Studien haben bereits gezeigt, dass diese Art der Modellierung es ermöglicht, verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, die das sogenannte Remodelling beeinflussen, in ein und dasselbe Modell miteinzubeziehen, zum Beispiel die Altersabhängigkeit [4], die Verfügbarkeit von Nahrung und Hormonen [5] und die gleichzeitige Berücksichtigung von spongiösem und kortikalem Knochen [6]. Der letztgenannte Aspekt ist für die Betrachtung von Frakturen wesentlich, da meist sowohl die Knochenrinde wie auch das Knocheninnere durch eine Fraktur betroffen sind. Die nun am Modell vorgenommene Modifikation, zusätzlich die Knochenheilung einzubeziehen, stellt somit eine breitere Anwendung des Modells, auch im Hinblick auf die Gestaltung und Simulation der Implantat-Integration, dar.

Die Heilung von Knochenbrüchen ist ein sehr komplexer Prozess auf verschiedenen Ebenen. Das neue Modell auf makroskopischer Ebene berücksichtigt deshalb der Einfachheit halber u. a. keine Hämatome oder zellulären Aktivitäten. Es wird vielmehr ein allgemeiner phänomenologischer Stimulus verwendet, um die biologischen Bedingungen und Prozesse zu berücksichtigen. Dieser Heilungsreiz beinhaltet auch Druckbedingungen, die beispielsweise durch Fluidströmungen auf mikroskopischer Ebene auftreten können. Im neuen Modell wird klar unterschieden zwischen dem externen mechanischen Stimulus, der sich aus der alltäglichen Belastung ergibt, und dem Stimulus, der den Heilungsprozess vorantreibt.

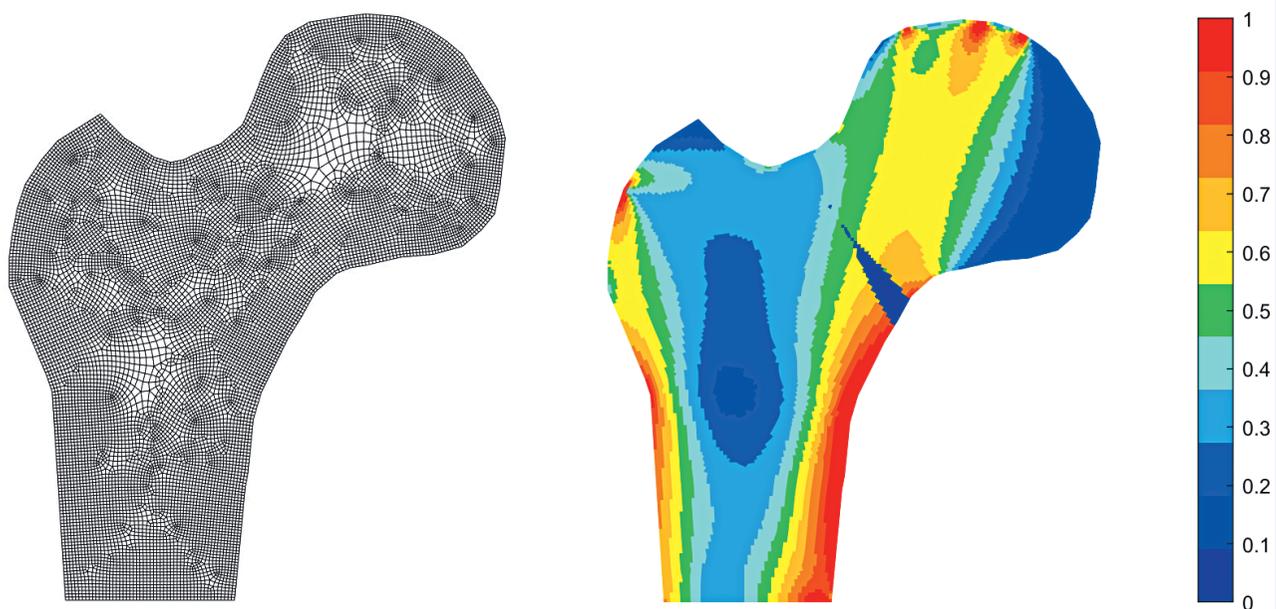


Abb. 4: Modell des proximalen Femurs – Vernetzung und Verteilung der nominalen Dichte zum Zeitpunkt der Fraktur (Bild: Ina Schmidt)

Die Heilung der Frakturen sowie das Remodelling werden sowohl lokal als auch zeitabhängig betrachtet. Das Modell wurde in das vorhandene Finite-Element-Framework in MATLAB implementiert und am Beispiel eines gebrochenen proximalen Femurkopfes bzw. Oberschenkelhalskopfes untersucht, siehe Abb. 4. Zum Simulationszeitpunkt t_0 , bei welchem die Fraktur auftritt, werden die Elemente, die sich im Bereich der Fraktur befinden, konzeptionell durch eine nominale Dichte von nahezu null dargestellt. Während des anschließenden Heilungsprozesses überlagern sich die beiden Stimuli. Im Modell ist hierfür eine Wichtung vorgesehen, die u. a. die Ruhigstellung des gebrochenen Knochens abbilden kann. Der Verlauf des Heilungsreizes kann durch verschiedene Funktionen bzw. Parameter modelliert werden. Verschiedene Varianten wurden formuliert, simuliert und veröffentlicht [7]. Es wird angenommen, dass sich das Knochengewebe zu einem Zeitpunkt $t_{\text{healed}} > t_0$ wieder, allerdings ohne spezifische Ausrichtung, aufgebaut hat und damit der eigentliche Heilungsreiz endet. Im weiteren

Verlauf bestimmt das Remodelling bzw. der mechanische Stimulus, auch durch eine nun wieder höhere Belastbarkeit, die Dichteentwicklung des Knochens.

In der Abbildung 5 ist in den oberen Bildern die in der Fraktur zunehmende Dichte während des dominierenden Heilungsprozesses gut zu beobachten. Nach der abgeschlossenen Heilungsphase zeigt sich in den unteren Bildern deutlich der Knochenumbau und am Ende die Wiederherstellung der ursprünglichen Knochenstruktur. Die Ergebnisse wurden mit Unfallchirurgen besprochen und für qualitativ vielversprechend befunden. Die Bestimmung bzw. Festlegung der in die Funktion eingehenden Parameter ist bislang rein phänomenologisch und bedarf weiterer intensiver Untersuchungen.

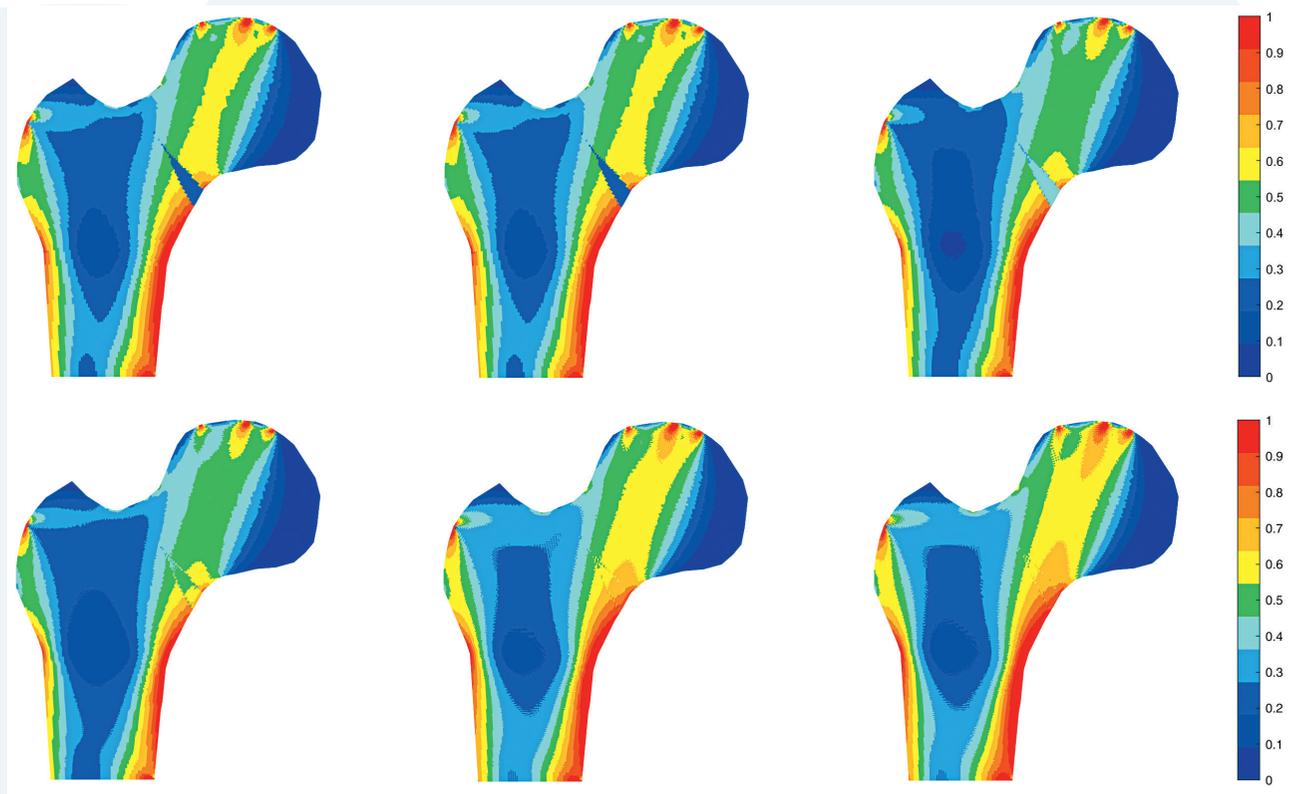


Abb. 5: Modell des proximalen Femurs – Zeitliche Entwicklung der nominalen Dichte nach der Fraktur: reine Heilung (oben) und anschließendes mechanisch stimuliertes Remodelling (unten) (Bild: Ina Schmidt)

Alle bisherigen Arbeiten der Arbeitsgruppe wurden in einem eigenen MATLAB-Code umgesetzt. Mit der open-source Finite Element Software deal.ii, einem wachsenden, in C++ geschriebenen Code wird eine umfangreiche und für viele physikalische Probleme erprobte Bibliothek und hoch performante Infrastruktur sowie interessante Community geboten, siehe auch <https://www.dealii.org/>. Im Zuge des intensiven Austausches mit Prof. McBride von der University of Glasgow, auf dessen theoretischen Vorarbeiten zur Flexoelektrizität in diesem Projekt aufgebaut wird, wurde der Entschluss gefasst, das Modell in deal.ii zu implementieren und die Vorteile dieser Entwicklungsumgebung zu nutzen. Dazu war es zunächst nötig, sich in den umfangreichen Code einzuarbeiten und das bis dahin entwickelte umfangreiche Modell der Knochenumbauprozesse von MATLAB in deal.ii zu überführen bzw. dort zu einem großen Teil neu zu implementieren. Das Bone Remodelling war bis dato in deal.ii nicht vorhanden gewesen, siehe Abb. 6 und 7.

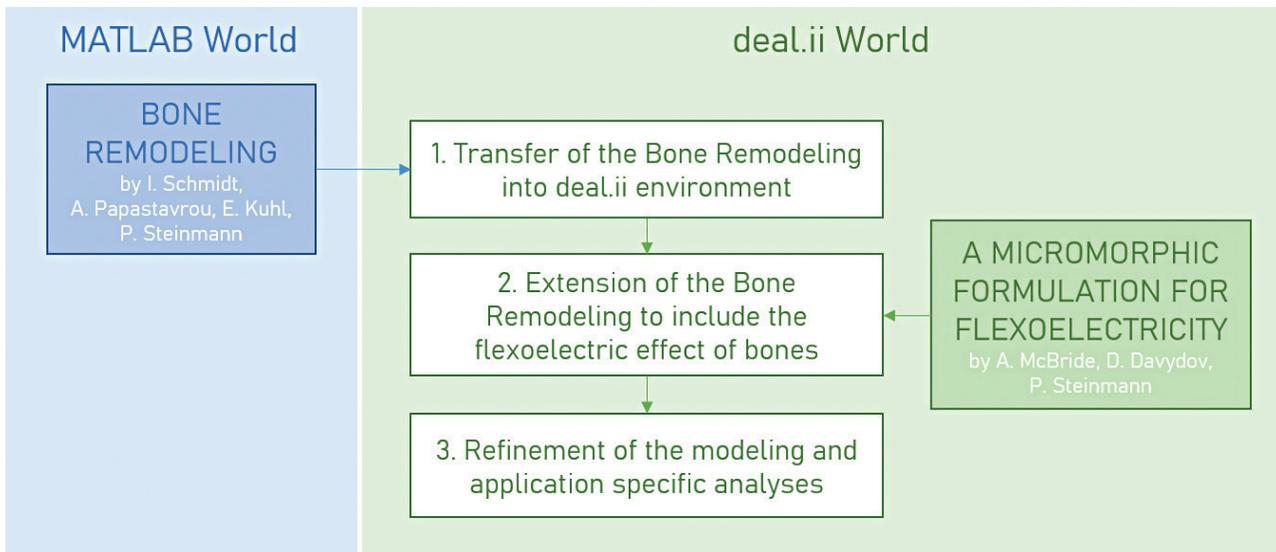


Abb. 6: Code-Welten – MATLAB und deal.ii (Bild: Anna Titlbach)

```

...
% density update for functional adaption
function [var,facs,fact]=updt_den(F,var,mat,ndim)
    emod = mat(1);  nue = mat(2);  rho0 = mat(3);  psi0 = mat(4);
    expm = mat(5);  expn = mat(6);  dt = mat(7);  c_rs=mat(8);
    xmu = emod / 2.0 / (1.0+nue);
    xlm = emod * nue / (1.0+nue) / (1.0-2.0*nue);

    J = det(F);
    C = F'*F;
    I1 = trace(C);
    psi0_neo = xlm/2 * log(J)^2 + xmu/2 *(I1 - ndim - 2*log(J));

    % euler backward - implicit time integration
    if psi0_neo > 1e-30
        rho_k0 = (1 + var) * rho0;
        rho_k1 = (1 + var) * rho0;
        r0 = c_rs*((rho_k0/rho0)^(expn-expm)*psi0_neo-psi0);
        iter = 0;
        res = 1;

        % local newton-raphson iteration
        while abs(res) > tol
            iter=iter+1;
            r0 = c_rs*((rho_k1/rho0)^(expn-expm)*psi0_neo-psi0);
            res =rho_k1-rho_k0-r0*dt;
            dres=1-(expn-expm)*(r0+c_rs*psi0)*dt/rho_k1;
            drho = -res/dres;
            rho_k1 = rho_k1+drho;
            if(iter>40); disp(['*** NO LOCAL CONVERGENCE ***']);
            return; end;
        end

        rho = rho_k1;
    end
...
// This function determines the density update
NumberType
get_rho(const NumberType &rho_k0,
        const double &dt,
        const Tensor<2, dim, NumberType> &F,
        const NumberType &Psi)
{
    double rho_k1 = rho_k0;
    const double tol = 1e-12;
    double iter = 0;
    double res = 1;
    double dres = 1;
    double drho = 1;
    double r0 = Psi-psi0_attractor;

    while (abs(res)>tol)
    {
        iter=iter+1;

        r0=c_rs*(pow((rho_k1/rho0),(expn-expm))*Psi-psi0_attractor);
        res=rho_k1-rho_k0-r0*dt;
        dres=1-(expn-expm)*(r0+c_rs*psi0_attractor)*dt/rho_k1;

        drho = - res/dres;
        rho_k1 += drho;

        if(iter>40)
        {Assert(false, ExcMessage("NO LOCAL CONVERGENCE"));
         break;}
    }
    return rho_k1;
}

void
update_end_timestep()
{
    rho_k0 = rho_k1;
}
...

```

Abb. 7: Funktionen des internen Dichte-Updates im Vergleich: MATLAB – deal.ii (Bild: Anna Titlbach)

Parallel dazu wurden die theoretischen Grundlagen zur Flexoelektrizität nachvollzogen. Die entsprechenden Grundgleichungen für flexoelektrisches Materialverhalten von Knochen bzw. die elektromechanische Kopplung höherer Ordnung sind formuliert. Flexoelektrizität erzeugt eine Polarisation aufgrund eines Verzerrungsgradienten im Material und umgekehrt eine Verzerrungsreaktion auf den Polarisationsgradienten. Diese inhomogene Verzerrung / Polarisation bricht die Zentrosymmetrie und tritt an Rissspitzen auf. Hier knüpft das Projekt an den oben beschriebenen Untersuchungen für die Knochenheilung auf makroskopischer Betrachtungsebene an.

In der verbleibenden Bearbeitungszeit des Forschungsprojektes sollen noch die Implementierungen in deal.ii abgeschlossen werden. Da es sich für die Flexoelektrizität um eine Drei-Feld-Formulierung handelt, sind diese durchaus komplex und entsprechend aufwendig.

An die Programmierarbeiten werden sich die Validierung der Umsetzung anhand des MATLAB-Codes einerseits und andererseits anhand von Beispielen zur Flexoelektrizität (mit anderen und einfacheren Materialmodellen) aus der Literatur anschließen. Die darauffolgenden Simulationen für Knochenmaterial sollen als Vorarbeiten für einen Antrag eines Anschlussprojektes dienen.

Anhand der erhaltenen Forschungsergebnisse wird ein besseres Verständnis dieser gekoppelten elektromechanischen Effekte im speziellen Material Knochen erwartet. Dies ist wichtig für die umfassendere Formulierung des Heilungsprozesses und dessen Simulation und Vorhersage. Darüber hinaus sind vor diesem Hintergrund weitere klinische Anwendungen wie die Prognose des Anwachsverhaltens von Implantaten von großem Interesse.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Kooperationspartner des Vorlaufforschungsprojektes Osteo-Flex sind die University of Glasgow in Person von Prof. Andrew McBride und der Lehrstuhl für Technische Mechanik der FAU, dort insbesondere Prof. Paul Steinmann. Nach einigen virtuell durchgeführten Treffen in 2021, reiste die Projektmitarbeiterin Anna Titlbach im November 2021 an die University of Glasgow. Dort fanden nicht nur intensive Projektbesprechungen mit Prof. McBride und Prof. Steinmann statt, sondern darüber hinaus wurden engere Kontakte zur Arbeitsgruppe am Glasgow Computational Engineering Centre (GCEC) von Prof. McBride und den dortigen deal.ii-Usern geschlossen. Aus den Diskussionen ergaben sich nicht nur konkrete und elegante Lösungen für den Implementierungsprozess, sondern auch weitere Ideen und die Grundlage für gemeinsame Veröffentlichungen. Ein erster Zeitschriftenbeitrag über die bereits erzielten Resultate wird vorbereitet. Es stehen noch Simulationen und Auswertungen aus. Die für die Einreichung adressierte Zeitschrift ist das Fachjournal *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*.

Auf Basis der ersten Erkenntnisse und Ergebnisse wird ein Antrag zur Einreichung bei der DFG für ein Folgeprojekt zur Modellierung und numerischen Analyse von Knochenheilungsprozessen unter Berücksichtigung der Flexoelektrizität und multipler Stimuli über mehrere Skalen konzipiert und vorangetrieben. Mit der beantragten Projektstelle soll die Fortbeschäftigung der wissenschaftlichen Mitarbeiterin Anna Titlbach, M. Sc., sichergestellt werden und die Weiterverfolgung ihres Promotionsvorhabens ermöglicht werden.

6. Literatur

- [1] Vasquez-Sancho F, Abdollahi A, Damjanovic D, Catalan G. Flexoelectricity in bones, *Advanced Materials*, 30, 1705316, DOI: 10.1002/adma.201801413, 2018.
- [2] Núñez-Toldrà R, Vasquez-Sancho F, Barroca N et al. Investigation of the cellular response to bone fractures: evidence for flexoelectricity, *Nature Sci Rep* 10, 254, DOI: 10.1038/s41598-019-57121-3, 2020.
- [3] McBride A, Davydov D, Steinmann P. Modelling the flexoelectric effect in solids: a micromorphic approach, *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 371, DOI: 10.1016/j.cma.2020.113320, 2020.
- [4] Papastavrou A, Schmidt I, Deng K, Steinmann P. On age-dependent bone remodeling, *Journal of Biomechanics*, 103:109701, DOI: 10.1016/j.jbiomech.2020.1097012020, 2020.
- [5] Papastavrou A, Schmidt I, Steinmann P. On biological availability dependent bone remodelling, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 23:8, 432–444, DOI: 10.1080/10255842.2020.1736050, 2020.
- [6] Schmidt I, Papastavrou A, Steinmann P. Bone fracture healing within a continuum bone remodelling framework, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 24:11, 1274–1285, DOI: 10.1080/10255842.2021.1880573, 2021.
- [7] Schmidt I, Albert J, Ritthaler M, Papastavrou A, Steinmann P. Concurrent consideration of cortical and cancellous bone within continuum bone remodelling, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, DOI: 10.1080/10255842.2021.1998465, 2021.

Impressum

Vorlaufforschung 2021

Herausgeber:

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

Redaktion und Layout:

Hochschulkommunikation
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Postfach 210320, 90121 Nürnberg

Bildnachweis:

- © Helena Angerer: 9, 10, 13, 14
- © Fakultät Angewandte Chemie: 22, 23, 24, 25, 26, 27
- © CHUTTERS NAP, unsplash: 30, 33
- © Roman Kruglov: 34, 40
- © Projektbericht DynoSpec, POF-AC, TH Nürnberg: 36, 37, 38, 39
- © Olaf Kottas: 48, 54
- © Silvana Müller: 50
- © Clemens Gögele: 51, 53
- © Andreas Pradel: 52
- © Fakultät Angewandte Chemie: 56, 58, 60, 62, 64, 65, 66, 67
- © Silas Leidel, Christiane Dettelbacher: 70, 74 u., 75 o., 77, 78 o., 79
- © Christian Bauer: 73
- © Günter Kießling: 74 o.
- © Christiane Dettelbacher: 75 u., 76, 78 u., 80
- © Werkstofftechnik / Arbeitsgruppe Energieeffiziente Werkstoffe / EnCN:
84, 91, 92, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106
- © Marco Masannek: 108, 110, 113 u., 115 o., 116
- © Marcus Fenn: 113 o.
- © Sally Zeitler: 114, 115 u., 117
- © Ina Schmidt: 118, 121, 122, 123
- © Areti Papastavrou, InaSchmidt: 120
- © Anna Titlbach: 124

Stand: Juni 2022



ISSN 1867-4585