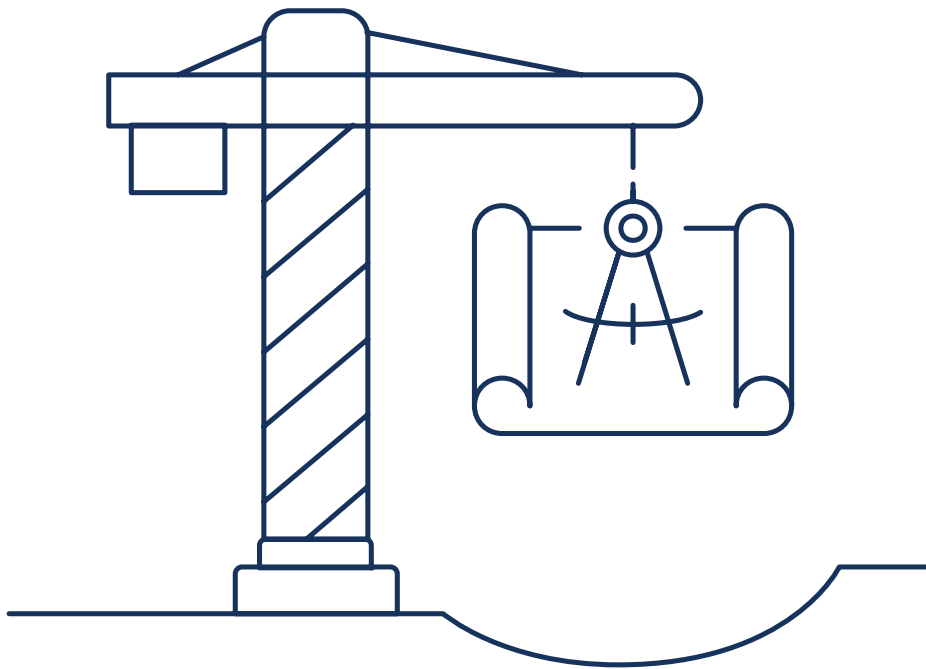


# Tagungsband zum 9. BIH-Treffen

Institut für Bauwesen



# Tagungsband

---

9. BIH-Treffen 2025

Herausgeber:  
Kay Lengert, M. Sc.

Hochschule für angewandte Wissenschaften Kiel  
Grenzstraße 3, 24149 Kiel

DOI: <https://doi.org/10.34657/30818>  
Handle: <https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/31749>

Kiel, den 02.03.2026

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
<b>Strukturelle Hemmnisse für die Nutzung des digitalen Gebäuderessourcenpasses</b> Anika Steinkuhl, Dr.-Ing. Susanne Schwickert, Vanessa Ifftner, Lilo Naughton Circular Lab, Technische Hochschule Ostwestpfalen	<b>6-14</b>
<b>Qualitätskontrolle von Bauleistungen mittels Terrestrischer Laserscans</b> Cedric Gadischke Hochschule Ruhr-West	<b>15-24</b>
<b>Prospektive Lebenszyklusanalyse</b> Nathalie Glenn Technische Hochschule Graz, Institut für Tragwerksplanung	<b>25-36</b>
<b>Ingenious Quizzing</b> Tom Bender, Jonah Albes Hochschule Mainz	<b>37-41</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale</b> Le-Vu Thanh Vivien; Meckmann, Frank Felix Hochschule Ruhr-West	<b>42-53</b>
<b>Verbundverhalten nichtmetallischer Bewehrung</b> Kay Lengert Hochschule für angewandte Wissenschaften Kiel	<b>54-62</b>

## Vorwort

Vom 27. bis zum 29. August fand die **neunte Fachtagung für wissenschaftliche Beschäftigte und Nachwuchskräfte an Bauingenieur-Institutionen der Hochschulen** (kurz: BIH-Treffen) bei uns an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in Kiel statt.

Das BIH-Treffen bietet eine hervorragende Möglichkeit zu fachlichem und persönlichem Austausch unter den wissenschaftlichen Mitarbeitenden der HAWs. In diesem Rahmen werden Fachbeiträge zu aktuellen Forschungsthemen, Anwendungen aus Labor und Praxis und innovative Ausbildungsmethoden präsentiert. Das BIH-Treffen wurde bereits im Jahr 2016 von der Hochschule Ruhr West in Mülheim an der Ruhr ins Leben gerufen. Die ersten Treffen fanden in Mülheim an der Ruhr (2016), Gießen (2017) und Köln (2018) statt. Das vierte Treffen wurde in Dresden (2019) ausgerichtet, gefolgt von Veranstaltungen in Frankfurt am Main (2021), Bielefeld (2022), Berlin (2023) und Mainz (2024).

Wir haben uns sehr gefreut, dass wir, als noch junges Institut für Bauwesen, sieben Jahre nach unserer Gründung, selber Austragungsort werden durften und somit einen Beitrag zur Vernetzung der HAWs und junger ambitionierter Menschen leisten konnten.

Im Rahmen des neunten BIH-Treffens wurden Vorträge aus den Bereichen konstruktiver Ingenieurbau, Baubetrieb, dem nachhaltigen Umgang mit der gebauten Umwelt sowie Umsetzungen in der Lehre präsentiert. Zudem gab es für die Teilnehmenden eine Führung durch die Labore des Institutes für Bauwesen auf dem Campus und am Seefischmarkt sowie Vernetzungen in den Abendstunden rund um die Kieler Förde. Die Poster-Session bildete den Abschluss der Veranstaltung. Insgesamt nahmen 21 Personen von 7 Hochschulen aus dem Bundesgebiet teil. Die Veranstaltung wurde von Kay Lengert, Laboringenieur und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauwesen organisiert, der auch einen Vortrag über das Verbundverhalten nichtmetallischer Bewehrung präsentiert hat. Auf den folgenden Seiten sind alle Vorträge im Rahmen eines Kurzbeitrages zusammengestellt.

Ein herzlicher Dank an alle Teilnehmenden und allen, die zum Gelingen des Treffens beigetragen haben.

Wir freuen uns auf das nächste BIH-Treffen in 2026 in Mülheim an der Ruhr und vielleicht auch zukünftig selber mal wieder Austragender sein zu dürfen.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz

## **Liste der teilnehmenden Hochschulen**

Hochschule Ruhr West

Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe

Hochschule Mainz

Hochschule für angewandte Wissenschaften Kiel

Technische Hochschule Köln

Hochschule Bielefeld - Campus Minden

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

# Strukturelle Hemmnisse für die Nutzung des digitalen Gebäuderessourcenpasses

Anika Steinkuhl, Dr.-Ing. Susanne Schwickert, Vanessa Ifftner, Lilo Naughton  
Circular Lab, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Detmold

*Abstract: Um die Kreislaufwirtschaft in der Bauindustrie langfristig zu steigern, werden in Entscheidungssituationen Informationen über die gebaute Umwelt benötigt – Daten, die häufig nicht verfügbar sind. An dieser Stelle will der Gebäuderessourcenpass ansetzen, doch dessen Umsetzung ist bisher wenig verbreitet. Diese Untersuchung nimmt strukturelle Hemmnisse von verwandten Konzepten in den Fokus, um bei der Entwicklung einer Umsetzungsstrategie für den Gebäuderessourcenpass diesen entgegengewirkt werden kann.*

*Die Ergebnisse zeigen, dass bei dem Digital Building Logbook und dem Material Passport Unklarheiten über den Nutzen vorhanden sind und dass durch die Komplexität von Informationupdates die Datenqualität und -verlässlichkeit eingeschränkt ist. Gleichzeitig sind es diese beiden Aspekte, die den Erfolg eines Passes sichern. Zusätzlich konnte eine Vielzahl an Geschäftsmöglichkeiten festgestellt werden.*

*Durch die thematische Ähnlichkeit der Konzepte in ihrem Typ, digitale Speicherung von Gebäudedaten in einem konzentrierten Format, lässt sich davon ausgehen, dass diese Hemmnisse auch bei dem Gebäuderessourcenpass entstehen könnten. Durch eine gezielte Weiterentwicklung und Berücksichtigung bei der Planung einer Implementierung kann diesen Hemmnissen entgegengewirkt werden.*

## 1. Einleitung

Die anstehende Bauwende nimmt Ressourcen mehr in den Fokus und adressiert eine Unabhängigkeit von Primärressourcen. Dabei wird die Nutzung und Wiedereinbringung von Sekundärmaterialien eine hohe Bedeutung bekommen. Aktuell stammt knapp die Hälfte der Sekundärmaterialien aus Bau- und Abbruchabfällen, während nur 22 % der Bau- und Abbruchabfälle für die Erzeugung von Sekundärmaterialien verwendet werden, was ein hohes Zirkularitätspotenzial unterstreicht [1, S. 28]. Um das Material langfristig in einem Kreislauf zu bewahren und um Urban Mining umzusetzen, ist es notwendig bestimmte Informationen über das Material zu wissen wie z. B. Menge, Qualität, Verbindungstyp oder Einbauposition. Mit einem Pass über ein Gebäude bzw. dessen Materialien ist es möglich Ressourcen effizienter zu nutzen und die Rückgewinnung dieser aus bestehenden Gebäuden zu steigern, und damit zusätzlich auch Abfälle zu reduzieren [2].

Diese Untersuchung wurde im Rahmen der Baubegleitforschung des Forschungsprojektes Smart Recycling Factory durchgeführt. Die zu errichtende Forschungsinfrastruktur wird zirkulär gedacht, verwendet lokale und nachhaltige Materialien und berücksichtigt die

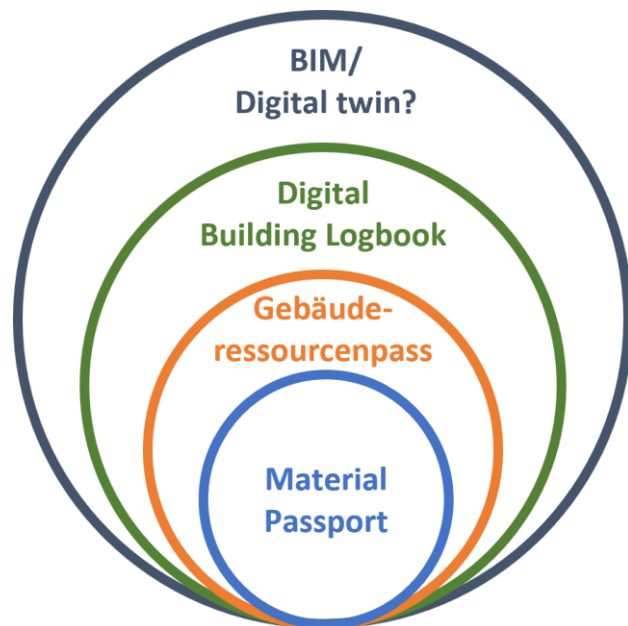
Nachnutzung von diesen. Um dies messbar zu machen werden verschiedene Bilanzierungsmethoden eingesetzt, wie auch der Gebäuderessourcenpass.

In Deutschland gibt es erste Initiativen zu der Inventarisierung von Gebäuden. Die vorherige Bundesregierung plante im Koalitionsvertrag 2020 die Einführung eines Gebäuderessourcenpasses. Dieser Pass soll Lebenszykluskosten und graue Energie enthalten, außerdem wird damit bezweckt, dass der Wohnungsbau in Richtung einer zirkulären Wirtschaft beeinflusst wird [3, S. 71]. Derzeit gibt es allerdings nach wie vor keine geregelte Vorgehensweise in Deutschland. In der Wirtschaft haben sich ein paar Anbietende ergeben, die die Erstellung eines Gebäuderessourcenpasses und das Konzept für diesen anbieten. Dennoch sind in der Bauindustrie diese bisher nicht in der Fläche präsent.

Dieser Artikel hat das Ziel die strukturellen Hemmnisse für die Nutzung des Gebäuderessourcenpasses festzustellen. Dies ist relevant um die Hauptaspekte und Synergien zu erfassen und den Gebäuderessourcenpass weiterentwickeln zu können. Dafür wurden ähnliche Konzepte von Pässen untersucht, die einen Fokus auf die Materialien innerhalb eines Gebäudes setzen und zu denen bereits eine wissenschaftliche Betrachtung stattgefunden hat, um ein breites Bild der möglichen Hemmnisse zu erhalten.

## 2. Einordnung des Gebäuderessourcenpasses und der verwandten Konzepte

Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es noch kaum wissenschaftliche Artikel oder Forschung zum Gebäuderessourcenpass bzw. *building resource passport* in der englischsprachigen Forschung. Daher lassen sich die Hemmnisse des Gebäuderessourcenpasses schwer bewerten. Aus diesem Grund wurden Vergleichsobjekte genutzt. Es wurden Konzepte gewählt, die ebenfalls auf die Bauindustrie beziehen und die eine digitale Erfassung des Gebäudes anstreben, zusätzlich ist relevant, dass die Konzepte bereits umfangreich beforscht werden.



Daher wurde zum einen das Digital Building Logbook (DBL) ausgewählt und der Material Passport (MP). Die verschiedenen Konzepte und deren Datenumfang werden in Abbildung 1 dargestellt. Als ebenfalls relevant könnte Building Information Modelling angesehen werden, oder auch digitale Zwillinge. Doch für diesen Kontext wurden die Konzepte nicht gewählt, da die Datendarstellung aktuell noch keine Auswertung nach Ressourcen inkludiert. Somit können beide Konzepte als Datenbasis genutzt werden, sind aber nicht substituierend zum Gebäuderessourcenpass.

## 2.1. Digital Building Logbook (DBL)

Das DBL ist eine Quelle, in der alle relevanten Gebäudedaten gespeichert werden sollen. Dies können zum Beispiel Daten zur Energieperformance, zu Renovierungen, zu Smart Readiness Indikatoren, zum Lebenszyklus und Global Warming Potential oder auch zur Qualität des Raumklimas sein. Die Zielgruppe sind EigentümerInnen, Bewohnende, InvestorInnen sowie öffentliche Verwaltungen. [4, S. 5]

Eine Grundlage für das DBL wurde durch das gleichnamige europäische Forschungsprojekt gebildet, worauf in der späteren Forschung weiter aufgebaut wird.

Ein DBL Modell besteht aktuell z. B. aus der Definition der Daten-Ontologie und -Typen, welche darauf ausgelegt sein sollen möglichst flexibel gegenüber Anpassungen und anderen Systemen zu bleiben [5, S. 8]. Aktuell ist das DBL vor allem für die Betriebs- und Abbruchphase ausgereift. Durch langfristiges Datenmanagement und Aufzeichnung von Betriebs- und Wartungsdaten könnte die Langlebigkeit und Leistungsfähigkeit von Gebäuden optimiert werden. Durch die Nachverfolgung von Energieverbräuchen kann es bei der Planung von energieeffizienten Renovierungen unterstützen. [6, S. 16] Dabei ist die Kombination von dem Building Renovation Passport und dem DBL, welches über deutlich mehr Daten verfügt, relevant, um die Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung während des Sanierungsprozesses zu optimieren. Dabei wird die Relevanz der Interoperabilität der Daten betont, was durch Standardisierung von Datentypen geschehen kann [7]. Diese Standardisierung könnte vereinfacht werden durch die Aufteilung bzw. das Zusammenspiel von Materialpässen und Gebäudepässen. Diese müssten durch die Industrie oder die Entwicklung europäischer oder globaler Standards definiert werden, um globalen Herausforderungen gerecht zu werden und klimabezogene Strategien festlegen zu können. [8, S. 535]

## 2.2. Material Passport (MP)

Über den MP gibt es aktuell eine hohe Varietät, sowohl in der Begrifflichkeit als auch in der damit verbundenen Definitionen [9]. Daher ist schwer festzulegen, ob der MP eine kleinere oder größere Datenmenge umfasst als der GRP. An manchen Stellen wird er als Pass für Materialien definiert, an manchen Stellen sagt die Definition aus, dass alle Gebäudedaten erfasst werden. Abbildung 1 bedarf deshalb einer reflektierten Betrachtung.

Wird die enge Definition des MP genutzt, wonach lediglich materielle Eigenschaften aufgenommen werden, ist in dem Zusammenhang der Digitale Produktpass relevant. Dieser befindet sich aktuell in der Entwicklung und wurde 2024 über die Ökodesign-Verordnung europaweit eingeführt. Es sollen produktspezifische Daten digital zugänglich gemacht werden [10, Art. 2 (28)]. Dadurch soll u.a. der Zugang zu Informationen für Bürger:innen verbessert werden. [43, S. 33]

## 2.3. Gebäuderessourcenpass

Nach Gebetsroither et al. gibt es aktuell elf Gebäudepässe und Bewertungstools im deutschsprachigen Raum. Davon ist der Großteil in der Entwicklung oder an der Grenze zur Praxisreife. In der Anwendung sind laut den Autor:innen Madaster, EPEA Circularity Passport, Construcia und Concular, außerdem in der Forschung noch der BIM-basierte Materielle Gebäudepass der TU Wien. [11, S. 39]

Die Verbindung mit BIM wurde u. a. vom Zentrum für zirkuläre Wertschöpfung der FH Münster angeregt, welche den digitalen Gebäudepass in der Richtlinienreihe VDI 2552 "Building Informations Modeling" eingliedern möchte [12, A29]. Von Gebetsroither et al. wird es jedoch als naheliegend angesehen, den GRP an den Energieausweis anzugliedern, um so den umfassenden Bauteilkatalog der Bauphysik mit den Daten einer Baurestmassenermittlung zu kombinieren [11, S. 44]. Auch die Angliederung an den digitalen Produktpass (DPP) wurde angedacht. Der DPP könnte als Datengrundlage für den GRP dienen, da dieser langfristig verpflichtend sein wird, was beim GRP derzeit nicht geplant ist. Zusammen mit Bauwerksdatenmodellierung (in BIM) könnten dann z. B. Rückbauanleitungen erstellt werden. [13, S. 36]

### 3. Strukturelle Hemmnisse

Es werden zunächst die Hemmnisse des DBL dargestellt, folgend die des MP und abschließend werden die Überschneidungen herausgestellt. Die Zusammenfassung dieses Abschnittes ist in Abbildung 2 verdeutlicht.

Digital Building Logbook	Material Passport
<p><b>Kosten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung</li> <li>Einführung</li> <li>Updates etc.</li> </ul>	<p><b>Keine verbundenen Datenquellen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>keine Updates bei Veränderungen</li> <li>hoher Aufwand durch manuelles Erstellen/ Änderungen</li> <li>keine verlässliche Datensuche/-quelle</li> <li>keine Verknüpfung zu Sensorik</li> <li>Eigentum an Produktdaten</li> </ul>
<p><b>Daten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Statische Darstellung der Daten</li> <li>Verantwortung des Datenmanagements nicht geregelt</li> <li>Datenschutz nicht geregelt</li> <li>Zugang nur für bestimmte Stakeholder oder vor Ort</li> </ul>	<p><b>Fehlende Datenstandardisierung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>falsche Interpretation der Daten</li> <li>Materialmengen zu stark vereinfacht</li> <li>verwirrende Schätzung von Gebäude- und Materialanglebigkeit</li> </ul>
<p><b>Unklarer Nutzen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kein rechtlicher Rahmen</li> <li>Wenig Nutzungsfreundlich</li> <li>Geltungsbereich und Zweck unklar</li> </ul>	<p><b>Unklarer Nutzen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>fehlendes Verständnis/ Bewusstsein</li> <li>fehlender Business-Case</li> <li>fehlende Zertifizierung/ Validierung</li> <li>falsch verstandenes Konzept</li> </ul>

Abbildung 2: Hemmnisse der Vergleichskonzepte

Beim Digital Logbook lassen sich die festgestellten strukturellen Hemmnisse in drei Kategorien gliedern: die Kosten, die Daten und der Nutzen. [4], [14]

Für das DBL wurden die Kosten als zu hoch eingeschätzt, sowohl für die Entwicklung als auch für die Einführung und den Betrieb durch Updates. Es besteht kein klares Finanzierungsmodell: Weder ist festgelegt, ob DBLs aus privater oder öffentlicher Hand, noch unter welchen Bedingungen und zu welchen Anteilen, finanziert werden. [4, S. 55]

Die mangelnde Standardisierung bei dem Aufbau der notwendigen Datensätze führt zu erschwerten Bedingungen bei der Erfassung aller Daten. Fragen hinsichtlich des Datenschutzes und fehlender rechtlicher Grundlagen auf EU-Ebene sowie mögliche Abweichungen oder Sonderregelungen durch manche Staaten führen zu Unsicherheiten beim Nutzen des DBL. [4, S. 57]

Vorteile und Nutzen des DBL für Interessengruppen sind nicht klar ersichtlich. Zu den Vorteilen des DBL zählen unter anderem eine höhere Transparenz innerhalb der Baubranche, Zirkularität und Innovation, aber auch weitere Branchenspezifische Vorteile. Fehlt dieses

Verständnis, wird die Führung des DBL als potenzielle zusätzliche bürokratische Belastung gesehen. [4, S. 55]

Die Tools des DBL sollten laut einer Umfrage unter 68 Probanden, welche verschiedene Interessengruppen widerspiegeln, nutzerfreundlich gestaltet sein. 83% der Befragten gaben demnach an, dass die Nutzerfreundlichkeit ein Schlüsselfaktor eines erfolgreich entwickelten DBL sei. [14, S. 15] Mangelt es an Nutzerfreundlichkeit, kann dies die Eingabe von Daten erschweren und somit Interessengruppen abschrecken [4, S. 56].

Des Weiteren gaben 55% der Befragten im Rahmen derselben Umfrage an, dass mangelnde Motivation, das DBL auf einem aktuellen Stand zu halten, eine hohe Barriere darstelle [14, S. 16]. Der Mangel an Motivation kann durch die bereits genannte mangelnde Nutzerfreundlichkeit der Plattform, sowie fehlendes Verständnis und Wertschätzung der Ergebnisse, erklärt werden. Automatische Updates durch eine Synchronisierung mit den technischen Anlagen des Gebäudes könnten diese Hemmnisse eindämmen. [4, S. 56]

Die Hemmnisse des MP lassen sich in die Kategorien nicht verbundener Datenquellen, fehlende Datenstandardisierung und unklarer Nutzen gliedern.

Der hohe Aufwand durch manuelles Erstellen und Ändern von zahlreichen Datensätzen kann Nutzer:innen schnell ermüden und zu fehlerhaften Ergebnissen führen [15, S. 5]. Aufgrund des manuellen Erstellens der Pässe, können Updates nicht automatisch durchgeführt werden, sondern erfordern einen hohen Zeitaufwand. Dies lässt sich durch fehlende Sensorik und eine geringe Implementierung von IT-Systemen erklären.

Fehlerhafte oder nicht vorhandene Grundlagendaten liefern Fehlinformationen, die sich auf die Datenqualität des gesamten Modells auswirken [15, S. 5]. Auch das Eigentum an Produktdaten erschwert die Datensuche, Konkurrenz und der Schutz von Betriebsgeheimnisse führen dazu, dass Unternehmen nicht alle Daten zur Verfügung stellen [16, S. 777].

Der MP ist noch nicht lange in der Baubranche etabliert. Aufgrund der steigenden Aufmerksamkeit hinsichtlich des Zirkulären Bauens werden vermehrt Lösungsansätze wie der MP entwickelt, jedoch sind diese noch nicht standardisiert [15, S. 4-5]. Ebenso gilt dies für die Daten von Bauprodukten, welche für die Bewertung ihres Recyclingpotenzials notwendig sind [16, S. 778]. Individuelle Interpretationen und Variationen bezüglich der Detailtiefe der betrachteten Daten beeinträchtigen die Genauigkeit des MPs [15, S. 6]. Werden lediglich Materialmengen angegeben, ohne Informationen zu ihrer Verarbeitung, Trennung und Rezyklierbarkeit, beeinträchtigt dies die Vereinfachung die Datenqualität [15, S. 6].

Die Schätzung der Lebensspanne von Gebäuden und Materialien generiert große Abweichungen, welche sich dann auf die Bewertung der Kreislauffähigkeit auswirken. Vorgegebene Standardwerte können hierbei stark von der Realität abweichen, während zugeschnittene Formeln erweitertes Mathematisches Verständnis fordern. [15, S. 5]

Herstellenden in der Baubranche fehlt Verständnis und Bewusstsein über zirkuläre Bauweisen, was in einem Mangel an zirkulären Geschäftsmodellen resultiert. Zusätzlich wird der Einsatz von Sekundärmaterialien durch das geringe zertifizierte Angebot gehemmt. [16, S. 778]

Sowohl das DBL als auch der MP weisen Hemmnisse auf. Der unklare Nutzen findet sich sowohl bei dem DBL und auch dem MP wieder, und spiegelt eine grundlegende Fragestellung

des Konzeptes. Ebenso ist die statische Darstellung der Daten in beiden Konzepten als problematisch angesehen.

Der Nutzen muss deutlicher hervorgehoben werden etwa durch die Entwicklung eines passenden Geschäftsmodells oder einer Anpassung an die Marktumgebung. Während die Problematik der statischen Darstellung sich durch die weitere Entwicklung der Technik lösen kann.

#### 4. Erfolgsfaktoren und Geschäftsmodelle

Innerhalb des europäischen Forschungsprojektes zum DBL wurden 40 Initiativen analysiert, um deren Erfolgsfaktoren festzustellen. Zusätzlich werden aus der Literatur zum Materialpass folgende potenziellen Geschäftsmodelle beschrieben. Die Zusammenfassung dieses Abschnittes findet sich in Abbildung 3.

Digital Building Logbook	Material Passport
<b>Standardisiert</b>	<b>Prozess</b>
basierend auf Studien/Tests/Expert:innenwissen regelmäßige Updates (vom Programm) Ausrichtung an anderen Initiativen/Standards definierter Prozess	Marktvorteil durch Infos zum Zirkularitätspotenzial Beratung der Nutzenden neue Geschäftskonzepte (Mietmodelle etc.)
<b>Daten</b>	<b>Material</b>
Validierungsprozess	Produkt Performance nachvollziehbar Materialwert verstehen Ermöglichen von erhaltendem Rückbau Markt für Sekundärbaustoffe /-teile Qualitätsprüfungen
<b>Nutzen</b>	<b>Effizienz</b>
Klarer Zweck einfache Nutzung / Nutzungsfreundlich Klares rechtliches Regelwerk	verringerte Umwelteinflüsse Lebenszyklusdesign Abfallminderung effizientere Bauten Datenbasierter Immobilienbetrieb

Abbildung 3: Erfolgsfaktoren und Geschäftsmodelle der Vergleichsobjekte

Die Erfolgsfaktoren des DBL lassen sich in drei Kategorien einteilen: die Standardisierung, die Daten und der Nutzen.

Von den untersuchten Initiativen hatte ein Großteil standardisierte Datenstrukturen und Vorgehensweisen. Dadurch vereinfacht sich die Komplexität der Nutzung. Zusätzlich kann die Usability verbessert werden, wenn Programme die Inhalte selbstständig updaten. Dies kann durch Verlinkungen zu anderen Datenbanken der Fall sein. Eine weitere Verbesserung der Datenqualität und auch ein Schutz der Daten kann durch einen Validierungsprozess erfolgen. [4]

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Definition von einem Nutzen. Wenn der potenziellen Kundengruppe der Zweck des DBL deutlich ist, kann dieses auch seinen Mehrwert entfalten und Anwendung finden. Erfolgreiche Initiativen zeichneten sich dadurch aus, dass ein klarer Nutzen vermittelt wurde. [4]

Zusätzlich ergab sich durch die Sicht von Teilnehmenden eines Webinars, dass die Usability oberste Priorität hat und auch die Anwendbarkeit über verschiedene Gebäudetypen und Benutzungsfreundlichkeit durch verschiedene Stakeholder wurden als wichtige Kriterien hervorgehoben [14].

Beim MP wurden tendenziell eher die Marktpotenziale herausgearbeitet. Diese lassen sich ebenfalls in drei Kategorien einteilen: der Prozess, das Material und die Effizienz.

Beim Prozess kann sich für Unternehmen durch den MP ein Marktvorteil aufgrund bereitgestellter Informationen ergeben. Dies können allgemeine Daten und Daten aus dem Produktkontext sein: Verwendung und Standort sowie Kreislaufpotential [15]. Diese Informationen unterstützen die Nachvollziehbarkeit der Materialien und schaffen Transparenz hinsichtlich des Zirkulitätspotentials. Zudem ermöglicht der MP den Nutzenden eine Beratung, indem er Informationen zu Installation, Wartung, Reinigung, Demontage und Wiederverwendungsmöglichkeiten zugänglich macht. Dadurch können neue Geschäftskonzepte wie Miet-, Leasing- oder Materialbankmodelle unterstützt werden. [16]

Auf der Materialebene ermöglicht der MP eine nachvollziehbare Produkt Performance und ein Verständnis des Materialwerts aufgrund der Bereitstellung seiner Daten. Die Erfassung der Materialzusammensetzung in Verbindung mit den Kriterien wie „Design for disassembly“, in der beispielsweise beschrieben wird wie Materialien verbunden werden, ermöglicht die Grundlage für einen erhaltenden Rückbau [15]. Durch Informationen, die eine weitere Nutzung oder einen Wiederverkauf ermöglichen, wird der Materialwert gesteigert. Hierdurch wiederum kann ein Markt für sekundäre Rohstoffe und Bauteile entstehen. Besonders relevant hierbei sind Nachweise über die Qualität, welche einen weiteren Geschäftsbereich eröffnen.

Die Effizienz des MPs zeigt sich unter anderem in den folgenden Aspekten:

Der MP trägt zur Verringerung von Umwelteinflüssen bei, indem Abfallmengen reduziert und der Bedarf an neuen Rohstoffen gesenkt werden. Die im MP bereitgestellten Informationen ermöglichen zudem eine lebenszyklusbezogene Betrachtung von Bauprodukten. Durch die verbesserte Rückverfolgbarkeit von Materialien in Bezug auf Volumen, Lage und weitere Spezifikationen kann darüber hinaus eine effizientere Planung und Ausführung von Bauprozessen unterstützt werden. [16]

## 5. Zusammenfassung

Das Ziel der Recherche war es, die Hemmnisse des Gebäuderessourcenpasses über die Analyse verwandter Konzepte zu spezifizieren und Erfolgsfaktoren zu identifizieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Feld der Hemmnisse breit ist und grundlegende Hemmnisse darunter sind. Besonders das fehlende Verständnis für den Nutzen der Konzepte stellt eine grundlegende Hürde dar, die sich sowohl beim DBL als auch beim MP spiegelt. Dennoch wird durch die Erfolgsfaktoren gezeigt, dass die Bearbeitung dieser Themen durch eine Standardisierung von Daten und einem definierten Nutzen die Möglichkeit eine erfolgreiche Umsetzung gefördert wird. Zusätzlich wurden potenzielle Geschäftsfelder im Rahmen des Gebäuderessourcenpasses im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft in der Bauindustrie aufgezeigt.

Mit dem Wissen über strukturelle Hemmnisse des Gebäuderessourcenpasses ist es möglich nächste Schritte zu planen. Um die Ergebnisse zu validieren ist die Überprüfung anhand von Expert:innenmeinungen aus der Bauindustrie notwendig. Die Ergebnisse zeigen, dass eine deutliche Definition vom Gebäuderessourcenpass, seinem Zweck, Funktionen und technische

Anforderungen notwendig ist. Durch klare Nutzungsszenarien lässt sich auch eine positive Wirkung auf die Kreislaufwirtschaft erwirken.

## Literatur

- [1] Circle Economy. "The circularity gap report 2025."
- [2] I. Markou, D. Sinnott und K. Thomas, "Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review," *Case Studies in Construction Materials*, Jg. 22, e04267, 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04267.
- [3] SPD, Die Grünen und FDP, "Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit," Koalitionsvertrag 2021 - 2025, 2021.
- [4] European Commission. "Study on the development of a European Union framework for digital building logbooks – Final report." Zugriff am: 16. April 2025. [Online.] Verfügbar: <https://data.europa.eu/doi/10.2826/659006>
- [5] M. Signorini, S. L. Spagnolo, A. Pavan und B. Daniotti, "Ontology-enabled Digital Building Logbooks for Facility Management," in *Proceedings of the 41st International Conference of CIB W78*, 2024, S. 1–10.
- [6] M. Signorini, M. C. Dejaco und S. Lupica Spagnolo, "The Evolution of Digital Building Logbook: Exploring Building Information Gathering Systems to Boost Building Maintenance and Renovation," *Applied Sciences*, Jg. 15, Nr. 2, S. 1–19, 2025, doi: 10.3390/app15020771.
- [7] S.-A. Hwang, S. Çetin, H. Visscher und A. Straub, "Advancing energy renovations through digitalisation: A critical review of EU policies and instruments," *Energy and Buildings*, Jg. 336, S. 1–13, 2025, doi: 10.1016/j.enbuild.2025.115627.
- [8] G. Leindecker *et al.*, "Material and Building Passports as Supportive Tools for Enhancing Circularity in Buildings," in *Circular Economy Design and Management in the Built Environment: A Critical Review of the State of the Art* (Springer Tracts in Civil Engineering), L. Bragança *et al.*, Hg., 1. Aufl. Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer, 2025, S. 507–543.
- [9] G. van Capelleveen, D. Vegter, M. Olthaar und J. van Hillegersberg, "The anatomy of a passport for the circular economy: a conceptual definition, vision and structured literature review," *Resources, Conservation & Recycling Advances*, Jg. 17, S. 200131, 2023, doi: 10.1016/j.rcradv.2023.200131.
- [10] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, *establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC: 2024/1781*, 2024.
- [11] M. Gebetsroither *et al.*, "Digitaler Gebäudepass für den Nachweis der Kreislauffähigkeit," *Paradigmenwechsel in Bau- und Immobilienwirtschaft*, S. 39–45, 2024. doi: 10.1007/978-3-662-68276-0\_6. [Online]. Verfügbar unter: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-68276-0\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-68276-0_6)
- [12] Henriette Strotmann, "Strategische Überlegungen zur Förderung der zirkulären Wertschöpfung in der Baubranche durch die standardisierte Erstellung eines digitalen Gebäuderessourcenpasses," *Bauingenieur*, Nr. 10, S. 27–29, 2023.

- [13] M. Gebetsroither *et al.*, "Digitaler Produktpass als Datengrundlage für den Gebäudepass," *Paradigmenwechsel in Bau- und Immobilienwirtschaft*, S. 31–38, 2024. doi: 10.1007/978-3-662-68276-0\_5. [Online]. Verfügbar unter: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-68276-0\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-68276-0_5)
- [14] European Commission und Executive Agency for Small and Medium-sized Enterprises (EASME), *Building logbook state of play: Report 2 of the study on the development of a European Union framework for buildings' digital logbook*. Publications Office of the European Union, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2826/519144>
- [15] V. Göswein, S. Carvalho, C. Cerqueira und A. Lorena, "Circular material passports for buildings – Providing a robust methodology for promoting circular buildings," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Jg. 1122, Nr. 1, S. 12049, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1122/1/012049.
- [16] M. R. Munaro und S. F. Tavares, "Materials passport's review: challenges and opportunities toward a circular economy building sector," *BEPAM*, Jg. 11, Nr. 4, S. 767–782, 2021. doi: 10.1108/BEPAM-02-2020-0027. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/bepam-02-2020-0027/full/pdf?title=materials-passports-review-challenges-and-opportunities-toward-a-circular-economy-building-sector>

# **Qualitätskontrolle von Bauleistungen mittels terrestrischer Laserscans**

## **Nutzung des Industry Foundation Classes (IFC)-Formats, um die Scanqualität beeinflussende Informationen abzubilden**

Cedric Gadischke

Hochschule Ruhr West, Mülheim an der Ruhr

*Abstract: Im Bauwesen sind terrestrische Laserscanner (TLS) ein Bestandteil der Bestandserfassung und Qualitätskontrolle, wobei statische und mobile Anwendungsmethoden zum Einsatz kommen. Die Standortplanung terrestrischer Laserscans stellt ein multikriterielles Problem dar, das durch aktuelle Forschungsprojekte mittels eines Greedy-Algorithmus als Näherungslösung adressiert wird. Ziel dieses Beitrags ist es, die Einflussfaktoren auf die Scanqualität eines Standorts zu identifizieren und im IFC-Format abzubilden, um die Daten zukünftig effizient auswerten zu können. Das IFC-Format bietet eine standardisierte Struktur, die es ermöglichen soll, einfachere mathematische Ansätze zur Optimierung der Standortplanung zu entwickeln.*

*Der Artikel untersucht technische Eigenschaften des TLS, wie die Messverfahren und ihre Auswirkungen auf Genauigkeit und Scanreichweite. Zudem werden die Eigenschaften der zu erfassenden Objektoberflächen, wie Textur und Farbe, und deren Einfluss auf die Scanqualität betrachtet. Auch der Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Bauteiloberfläche ist entscheidend.*

*Im IFC-Format werden Bauteile semantisch bspw. durch `IfcMaterial` für Werkstoffeigenschaften und `IfcTask` für die Terminplanung beschrieben, während die geometrische Darstellung durch `IfcShapeRepresentation` erfolgt. Darstellungsformen wie `SweptSolid`, `Brep` und `AdvancedBrep` ermöglichen die Modellierung unterschiedlicher geometrischer Komplexität. Die Darstellung beeinflusst die Auswertbarkeit der Daten, da komplexere Formen eine aufwendigere Verarbeitung erfordern.*

*Der Ausblick fordert weitere Untersuchungen zur Materialeinwirkung und der Entwicklung eines Algorithmus, der Bauteilinformationen effizient aus IFC-Dateien extrahiert und bewertet. Damit könnte die Komplexität der geometrischen Darstellung in maßgeschneiderte mathematische Ansätze integriert werden, um die Ressourcen bei der Auswertung zu optimieren und den Gesamtaufwand der Datenevaluation zu reduzieren.*

## 1. Einleitung

Terrestrische Laserscanner (TLS) finden in der Baupraxis Anwendung, insbesondere bei der Bestandserfassung und der Qualitätskontrolle. Im Zuge dessen kommen statische und dynamische bzw. mobile Verfahren zum Einsatz. [1–4] Die Verfahren unterscheiden sich in der Planung und Durchführung des Laserscans sowie in der Registrierung, durch die einzelne Scanaufnahmen zu einer Gesamtpunktwolke zusammengefügt werden.

Während bei dynamischen Verfahren Routen durch die zu erfassende Struktur abgeschnitten oder durchfahren werden, ist bei dem statischen Verfahren vorab zu planen, welche Standorte für terrestrisches Laserscanning geeignet sind. Ein adäquater Standort zeichnet sich durch die Erfüllung einer Vielzahl von Vorgaben aus, die sich gegenseitig beeinflussen wie bspw. die Reichweite und Winkelauflösung des Laserscanners und die Eigenschaften der zu Erfassenden Objektoberfläche, wodurch die Planung der Standorte ein multikriterielles Problem darstellt. [5]

Aktuelle Forschungsprojekte setzen sich mit der Standortermittlung auseinander und formulieren ein Maximierungsproblem, sodass mit möglichst wenigen Standorten die Mindestkriterien, die an den Scandatenumfang gestellt werden, erfüllt sind. Diese Fragestellung findet sich unter den Begriffen Planning for Scanning (P4S) und Next Best Scan (NBS) bzw. dem aus der Robotik bekannten Problem Next Best View (NBV). Das multikriterielle Problem wird häufig unter der Implementierung des Greedy-Algorithmus gelöst. [6–17] Diese Klasse der Algorithmen liefert jedoch nicht die optimale Lösung, sondern nähert sich dieser nur an. Andere Ansätze sind aufgrund des umfangreichen Rechenaufwands bisher nicht praktikabel. [6]

Ziel dieses Papers ist es, die Einflüsse auf die Scanqualität eines Standortes in dem IFC-Format abzubilden. In zukünftigen Untersuchungen sollen die in einem Building Information Model (BIM) hinterlegten Bauwerksinformationen, die den Soll-Zustand des Bauwerks im Planungsmodell (As-planned-Modell) darstellen, unter Verwendung des IFC-Schemas genutzt werden, um die Standortplanung unter Betrachtung der resultierenden Randbedingungen mit vereinfachten mathematischen Ansätzen lösen zu können. Die Nutzung des IFC-Formats soll durch die standardisierte Strukturierung von Informationen dazu beitragen, einen effizienten Algorithmus zu entwickeln.

Zunächst werden in Kapitel 2 Parameter vorgestellt, die Einfluss auf die Qualität eines terrestrischen Laserscans haben. In Kapitel 3 wird anschließend ein Ansatz aufgezeigt, wie die identifizierten Parameter und die geometrischen Eigenschaften eines Bauteils im IFC-Format abgebildet werden können. Die Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 und 3 werden im vierten Kapitel, dem Fazit, zusammengefasst und gegenübergestellt. Im Ausblick wird daraus ein Ansatz abgeleitet, wie die geplante Auswertung der IFC-Datei zur Ermittlung geeigneter Standorte mit vereinfachten mathematischen Ansätzen ermöglicht werden kann.

## 2. Einflüsse auf die Scanqualität

### 2.1. Technische Eigenschaften des TLS

Der um zwei Achsen rotierende terrestrische Laserscanner erfasst von einem Standpunkt aus die Umgebung, indem das Gerät Laserstrahlen aussendet, die auf Bauteiloberflächen

reflektiert werden und zum Gerät zurückkehren. Aus der Strahllaufzeit und der präzisen Winkelbestimmung resultiert die Laserdistanzmessung. Alle Reflexionspunkte werden zu einer räumlichen Punktwolke zusammengesetzt und repräsentieren das digitale Abbild der Realität. Üblicherweise wird der TLS nacheinander an mehreren Standorten platziert, sodass eine gesamtheitliche Punktwolke entsteht. Die Leistungsfähigkeit des TLS gibt vor, in welcher Qualität die Umgebung erfasst werden kann. Beispielsweise ist das zum Einsatz kommende Verfahren der Distanzmessung ausschlaggebend für die Reichweite, in der die Umwelt erfasst werden kann, sowie die Anfälligkeit für fehlerhafte Messungen. Weit verbreitet sind das Impulslaufzeitverfahren sowie das Phasenverschiebungs- bzw. Phasenvergleichsverfahren. Das als Waveform Digitizing bezeichnete Verfahren kombiniert die positiven Eigenschaften der beiden zuvor genannten Verfahren. [18] Die Eigenschaften der drei Verfahren sind in Tabelle 1 qualitativ dargestellt. Die qualitativen Werte sind von dem eingesetzten Gerät abhängig.

Tabelle 1: Gegenüberstellung gängiger Messverfahren in Anlehnung an [18]

Verfahren	Genauigkeit	Laserpunktgröße	Reichweite
Impulslaufzeit	Gering	Groß	Höchste
Phasenverschiebung	Höchste	Klein	Gering
Waveform Digitizing	Hoch	Klein	Hoch

Das Impulslaufzeitverfahren ist anfällig für Umgebungsrauschen und benötigt daher im Gegensatz zum Phasenverschiebungsverfahren und dem Waveform Digitizing eine hohe Differenz zwischen dem Impuls des Laserstrahls und dem Umgebungslicht, welche auch als Umgebungsrauschen oder Signal-to-noise ratio bezeichnet wird. Die Laserpunktgröße ist bei dem Impulslaufzeitverfahren am größten, sodass bei den anderen Verfahren ein präziserer Messpunkt erfasst wird. Das Impulslaufzeitverfahren ermöglicht Messungen über weite Distanzen, die mit dem Phasenverschiebungsverfahren nicht erreicht werden. Waveform Digitizing ermöglicht hohe Reichweiten.

Die Auflösung des Laserscanners hat ebenfalls einen Einfluss auf die resultierende Punktwolke. Je kleiner die Winkelauflösung des Gerätes eingestellt ist, desto detaillierter wird die Umgebung erfasst. Dieser Parameter wird als Punktdichte bezeichnet und ist zudem abhängig von der Distanz zwischen dem TLS und der zu erfassenden Oberfläche. Ein kleinerer Winkel zwischen zwei benachbarten Laserstrahlen, führt zu einer präziseren Erfassung einer Fläche bei gleicher Distanz zum Laserscanner. Die Winkelauflösung ist je Scanvorgang konstant. Im Wesentlichen sind die gerätespezifische Reichweite und der Distanzfehler entscheidend für das Maß der Genauigkeit (engl. Level of Accuracy, LOA), wohingegen die Winkelauflösung und -genauigkeit die Punktdichte (engl. Level of Density, LOD) bestimmen. Somit werden der Abstand zwischen dem zu erfassenden Bauteil und dem Laserscanner sowie der von einem Standort in ausreichender Qualität erfassbare Bereich durch diese Parameter beschränkt. Die Abbildung 4 verdeutlicht, dass die Winkelauflösung  $\phi$  einen Einfluss auf den LOD bzw. den Abstand  $d$  benachbarter Scanpunkte sowie die Distanz  $p$  zwischen Laserscanner und Bauteil bzw. die Einhaltung der maximalen Reichweite des Laserscanners und den Distanzfehler hat. Bei einer größeren Richtungsänderung bezogen auf den Normalenvektor der Bauteiloberfläche erhöhen sich der Abstand  $d$  und die Distanz  $p$ .

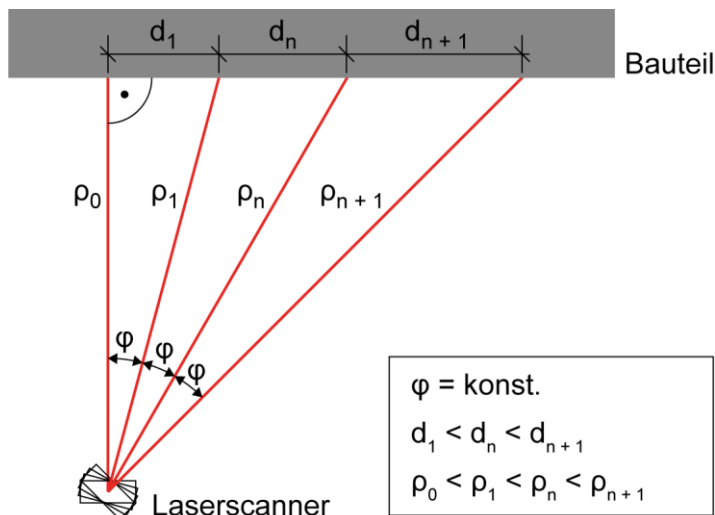


Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung des LOD in Abhängigkeit von  $\phi$  für einen Bereich eines Laserscans auf einer geraden Oberfläche in Anlehnung an [5]

## 2.2. Eigenschaften der zu erfassenden Bauteile

Die Qualität der Messung ist außerdem von den Eigenschaften der zu erfassenden Objekt-oberflächen abhängig. Die Textur und die Farbe der Oberfläche haben einen Einfluss auf die Reflexion des Laserstrahls. Während raue Oberflächen für eine diffuse Streuung des Laserstrahls sorgen, ermöglichen glatte Oberflächen eine höhere Intensität des reflektierten Laserstrahls. Dunkle Farben absorbieren den Laser, wobei helle Farben eine höhere Reflexion ermöglichen. Andere Materialien wie Glas oder Wasser erzeugen Spiegelungen, die sich negativ auf die Scanqualität auswirken, da fehlerhafte Messungen resultieren. Helle, glatte und nicht spiegelnde Oberflächen reflektieren den Laser mit einer hohen Intensität, sodass der Empfangssensor des Laserscanners die Messung bestmöglich auswerten kann und eine hohe Qualität sichergestellt ist.

Weiter ist die Darstellung der Geometrie relevant. Um eine ausreichend genaue Messung zu erhalten, darf der Einfallswinkel des Laserstrahls auf das Objekt nicht zu flach sein. Der Einfallswinkel ist in der Abbildung 5 mit  $\beta$  gekennzeichnet und wird von der Normalen der Bauteiloberfläche gemessen. Übertragen auf das Beispiel in der Abbildung 4 wird der Einfallswinkel der Laserstrahlen auf eine ebene Fläche bei einer zunehmenden Richtungsänderung bezogen auf den Normalenvektor der Bauteiloberfläche größer.

Nach Kavulya et al. [20] und Soudarissanane et al. [21] hat ein Einfallswinkel kleiner  $70^\circ$  keinen relevanten Einfluss auf die Genauigkeit der Messung. Der Umfang der in diesen Studien untersuchten Materialien und eingesetzten Laserscanner ist dabei gering. [5] Der maximal anzusetzende Einfallswinkel kann daher für andere Materialien und Geräte variieren.

Um die Einhaltung des maximalen Einfallswinkels zu prüfen, muss der Normalenvektor zur Bauteiloberfläche an jedem Punkt ermittelt werden können. Das Bauteil ist daher so detailliert darzustellen, dass alle Oberflächen im As-planned-Modell genau abgebildet werden.

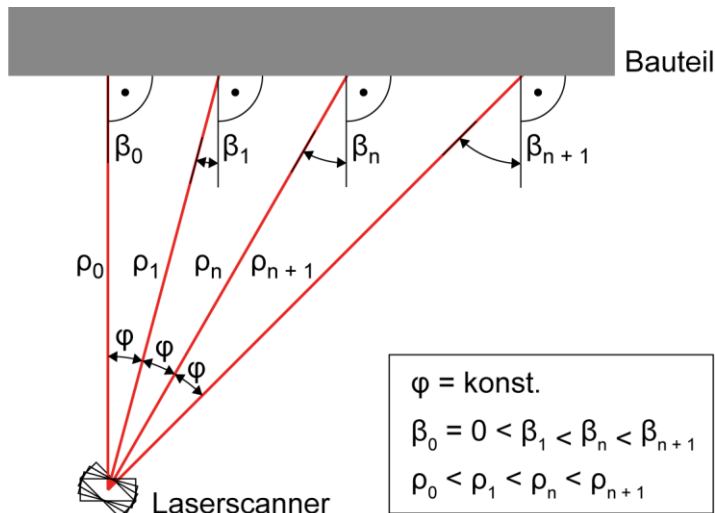


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung des Einfallswinkels auf einer geraden Oberfläche in Anlehnung an [19]

Eine weitere Eigenschaft bezieht sich auf die Existenz und die Sichtbarkeit eines Bauteils während verschiedener Zwischenbauzustände. Für einen spezifischen Scantermin müssen die zu diesem Zeitpunkt entstehenden oder bereits hergestellten Bauteile selektiert werden können. Umgekehrt ist der mögliche Zeitraum für einen Laserscan ableitbar, sodass Bauteile oder Bauteilschichten, die die Sicht von der potenziellen TLS-Position aus behindern, berücksichtigt werden können.

Für die Herstellung einer mehrschichtigen Wand aus Ortbeton und Putz resultiert z.B., dass die Betonoberfläche im Zeitraum zwischen dem Ausschalen und dem Verputzen mit dem TLS erfasst werden kann. Weitere Bauteile, die zuvor hergestellt wurden oder zeitgleich hergestellt werden, müssen bei der Standortplanung berücksichtigt werden. Folglich müssen für jede Bauteilschicht die Herstellungs- und Fertigstellungstermine bekannt sein.

### 3. Darstellung der Eigenschaften im IFC-Format

#### 3.1. Semantische Darstellung eines Bauteils

Der Werkstoff und die Farbe eines Bauteils sind als semantische Informationen im IFC-Format, idealerweise unter *IfcMaterial*, hinterlegt. [22]

Die Terminplanung ist mit jedem Bauteil zu verknüpfen, um den Start- und Fertigstellungstermin in die Standortplanung einbeziehen zu können. Ferner sind im Fall von Ablaufstörungen die Soll-Werte fortzuschreiben, um den Standpunkt auf Basis des Ist-Zustandes planen zu können. Dazu bietet sich die Entität *IfcTask* an, in der bspw. mit dem Attribut *IfcTaskTime* je Vorgang die Start- und Endtermine sowie die Dauer mit Soll- und Ist-Werten versehen oder die Anordnungsbeziehungen definiert werden können. [22]

Die Werte für die zuvor genannten Attribute sind für jede Bauteilschicht separat anzulegen, um bei der Standortplanung genau differenzieren zu können. Dazu kann entweder *IfcMaterialLayer* genutzt oder alternativ jede Bauteilschicht separat modelliert werden. [22]

Die zuvor genannten sowie weitere Bauteileigenschaften können grundsätzlich auch als frei definierbare Merkmalslisten (engl. Property Set, kurz Pset) hinterlegt werden. Um die Auswertung der IFC-Datei zu vereinfachen, sollten jedoch die vorhandenen standardisierten Entitäten mit Werten gefüllt werden. Die Psets können dabei helfen, Werte, die nicht

ausreichend in standardisierten Entitäten definiert werden können, dennoch in einer IFC-Datei abzubilden. Dazu zählen beispielsweise die Eigenschaften des TLS, der zum Einsatz kommen soll. Da in der Regel dasselbe Gerät für das gesamte Projekt verwendet wird, sind die Informationen zum TLS auf Projektebene zu implementieren, sodass die Information nicht zu jedem Bauteil hinzugefügt werden muss.

### 3.2. Geometrische Darstellung eines Bauteils

Die geometrische Darstellung der Bauteile in einem IFC-Modell als digitales Abbild des Soll-Zustandes wirkt sich auf die Berechnung des Einfallswinkels aus. Im Folgenden wird eine Auswahl der möglichen Darstellungsformen eines Bauteils im IFC-Format vorgestellt, die in der Entität *IfcShapeRepresentation* definiert sind. [22] Eine Übersicht mit einer kurzen Beschreibung der Darstellungsformen findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Auswahl von vordefinierten Darstellungsformen (*RepresentationType*) in *IfcShapeRepresentation* in Anlehnung an [22]

Typ	Beschreibung
SolidModel	repräsentiert die 3D-Form durch verschiedene Arten von Volumenmodell Darstellungen wie im Folgenden bezeichnet und beschrieben:
<ul style="list-style-type: none"> <li>SweptSolid</li> </ul>	Körper aus gesweepen 2D-Profilen bzw. Flächen, erstellt durch Extrusion entlang einer Geraden oder Rotation, ausgenommen konische Sweeps
<ul style="list-style-type: none"> <li>AdvancedSweptSolid</li> </ul>	Körper aus gesweepen 2D-Profilen bzw. Flächen, erstellt durch die Verschiebung des Profils entlang einer Leitlinie bzw. Trajektorie, sowie konische Sweeps
<ul style="list-style-type: none"> <li>Brep</li> </ul>	Boundary Representation, bei der die Oberflächen durch viele flache Facetten approximiert werden, die jeweils durch gerade Linien begrenzt sind
<ul style="list-style-type: none"> <li>AdvancedBrep</li> </ul>	Boundary Representation mit Oberflächen, die durch Basis-Splines (B-Splines) definiert werden; B-Splines wiederum werden mit mathematischen Funktionen definiert, die stückweise zusammengesetzte Polynomsegmenten (Splines) entlang einer gewichteten Summe von Punkten (Kontrollpunkte) verbinden und dabei eine glatte und kontinuierliche Kurve erzeugen
<ul style="list-style-type: none"> <li>Constructive Solid Geometry (CSG)</li> </ul>	Geometrien, die durch boolesche Operationen (bspw. Vereinigung oder Schnittmenge) zwischen Körpern, Halbräumen und anderen Ergebnissen boolescher Operationen erzeugt werden
<ul style="list-style-type: none"> <li>Clipping</li> </ul>	Differenz zwischen Körper aus gesweepen Flächen, Halbräumen und Ergebnissen boolescher Operationen
SurfaceModel	Flächenbasierte oder tessellierte (aus Polygonen zusammengesetzte) Oberflächenmodelle
<ul style="list-style-type: none"> <li>Tessellation</li> </ul>	Darstellung(en) der tessellierten Oberfläche

Für idealtypische Bauteile wie Wände, Boden- und Deckenplatten oder Stützen sind im IFC-Schema möglichst einfache Darstellungsformen vorgesehen. Diese Bauteile werden in der Regel gemäß dem Konzept „*Body SweptSolid Geometry*“ als Extrusion dargestellt. [22] Die

einfachste Form der Darstellung ist eine durch ein Polygon, das durch mehrere Koordinaten definiert ist, begrenzte Fläche, die entlang einer Linie im dreidimensionalen Raum extrudiert wird. In der Abbildung 3 ist dieses Konzept beispielhaft für eine Wand dargestellt. Die Komplexität der Darstellung nimmt von a) zu b) zu, da die Wand in b) an einer Kurve ausgerichtet wird.

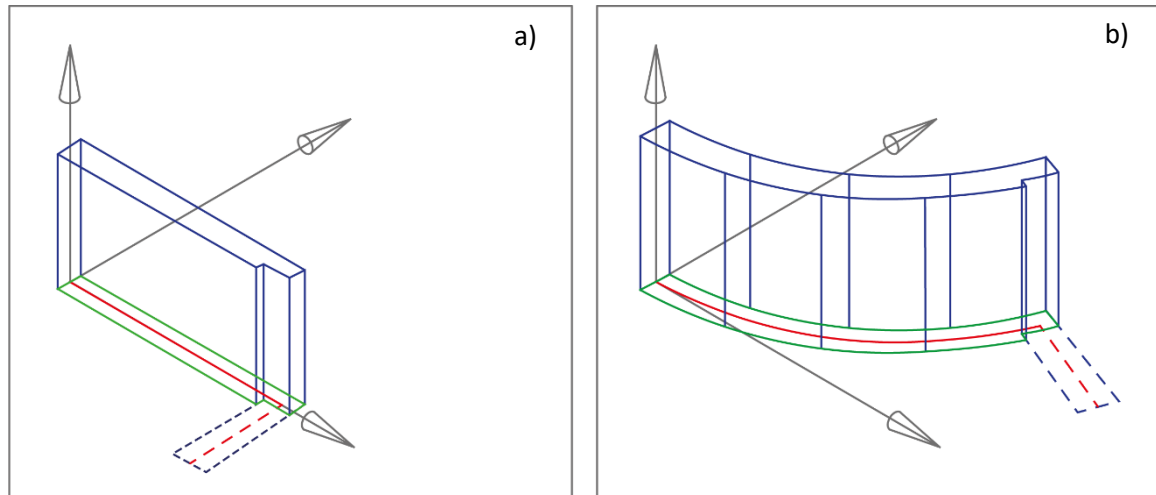


Abbildung 6: Darstellung einer Wand als Extrusion entlang einer a) Geraden und b) Kurve in Anlehnung an [22]

Die Komplexität dieses Darstellungskonzeptes kann sich weiter erhöhen, wenn sich der Querschnitt entlang der Extrusion verändert (gem. dem Konzept „*Body AdvancedSweptSolid Geometry*“ bspw. mit *IfcSurfaceCurveSweptAreaSolid* oder *IfcExtrudedAreaSolidTapered*), Öffnungen (*IfcOpeningElement*) eingefügt werden oder das Bauteil in Halbraumfestkörper (gem. dem Konzept „*Body Clipping Geometry*“ mit *IfcHalfSpaceSolid*) unterteilt wird. [22]

Bauteile, die mittels „*Body Brep Geometry*“ dargestellt werden, bestehen aus begrenzten Polygonen, die eine ebene Fläche ergeben (engl. boundary representation, Brep). Die einzelnen Breps werden in der Entität *IfcFacetedBrep* definiert. [22]

Komplexere Formen können mit dem Konzept „*Body AdvancedBrep Geometry*“, das zusätzlich Freiformen unterstützt, definiert werden. Jede Fläche wird durch Grundformen, geswepte oder Basis-Spline Oberflächen definiert. [22]

Zusammengefasst erhöht sich die Komplexität durch die Kombination verschiedener Darstellungsformen, die dann eine konstruktive Festkörpergeometrie (engl. Constructive Solid Geometry, CSG) ergeben. Im IFC-Format kann die CSG als *IfcCsgSolid* repräsentiert werden. [22]

#### 4. Fazit

Wird der Ansatz verfolgt, das IFC-Format zu nutzen, um die Qualität eines Laserscans beeinflussende Faktoren abzubilden, können im Soll-Modell vordefinierte Darstellungsformen bzw. *RepresentationTypes* genutzt werden. Semantische Informationen werden auf Projekt- oder Bauteilebene hinterlegt und sind schematisch auswertbar. Somit werden die Extraktion, Interpretation und Analyse der im IFC-Modell enthaltenen Informationen vereinfacht, da Nutzende die Informationen an denselben Stellen in der Datei abrufen und gleichbleibende Prozesse zur Weiterverarbeitung der Daten entwickeln können.

Bei den geometrischen Informationen beeinflusst die gewählte bzw. notwendige *IfcShape-Representation* die Komplexität. Innerhalb eines *RepresentationTypes* sind einzelne Darstellungsformen zu untersuchen. Im Falle des Typs *SweptSolid* nimmt der Umfang der Beschreibung einer Geometrie zu, wenn der Sweep-Pfad von einem linearen in einen nicht-linearen Pfad geändert wird.

Dagegen erlaubt der Typ *AdvancedBrep* insgesamt eine komplexe Darstellung, die jedoch mit einem höheren Aufwand bei der Auswertung einhergeht. Beispielsweise muss der Normalvektor für jede Teilfläche zur Ermittlung des Einfallswinkels eines Laserstrahls berechnet werden.

## 5. Ausblick

Um eine IFC-Datei für die Standortplanung von Laserscannern nutzen zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen von Materialien und deren Einfluss auf die Qualität von terrestrischen Laserscans, um bspw. den maximal möglichen Einfallswinkel des Laserstrahls auf eine Bauteiloberfläche in der Planung geeigneter Standorte des Laserscanners berücksichtigen zu können. Diese Informationen können dann in die Entwicklung eines Algorithmus einfließen, der die Bauteilinformationen aus der IFC-Datei ausliest und zusammen mit der geometrischen Darstellung des Bauteils auswertet. Um die Komplexität der geometrischen Darstellung zu berücksichtigen, könnten auf die *RepresentationTypes* zugeschnittene mathematische Ansätze entwickelt werden, sodass für die Auswertung z.B. weniger finanzielle Ressourcen benötigt werden. Durch die hinterlegten Bauzeiten werden die relevanten Bauteile und der Rechenaufwand insgesamt reduziert, da nicht alle Bauteile in dem IFC-Modell gleichzeitig ausgewertet werden.

## Literatur

- [1] *Akinci, B.; Boukamp, F.; Gordon, C. et al.:* A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. *In: Automation in Construction* 15 (2006), Heft 2, S. 124-138.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.01.008>.
- [2] *Abbaspour, A. (Hrsg.):* Digitales Bauen mit BIM – Use Case Management im Hochbau. Deutsches Institut für Normung, Beuth Innovation, bSD Verlag; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.
- [3] *Westphal, T.* Zeitgemäßes Qualitätsmanagement mit digitalen Vermessungswerkzeugen [online]. *In: Deutsche BauZeitschrift*, 2022 [Zugriff am: 06.05.2024], [https://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Zeitgemaesses\\_Qualitaetsmanagement\\_mit\\_digitalen\\_Vermessungswerkzeugen-3813846.html](https://www.dbz.de/artikel/dbz_Zeitgemaesses_Qualitaetsmanagement_mit_digitalen_Vermessungswerkzeugen-3813846.html).
- [4] *Hug, S.* Scannen statt messen [online] – Laserscannen in der Gebäudedokumentation. *In: Deutsche BauZeitschrift*, 2013 [Zugriff am: 06.05.2024], [https://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Scannenstatt\\_messen\\_Laserscannen\\_in\\_der\\_Gebaeuedokumentation-1578176.html](https://www.dbz.de/artikel/dbz_Scannenstatt_messen_Laserscannen_in_der_Gebaeuedokumentation-1578176.html).

- [5] *Aryan, A.; Bosché, F.; Tang, P.*: Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review. *In: Automation in Construction* 125 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103551>.
- [6] *Heidari Mozaffar, M.; Varshosaz, M.*: Optimal Placement of a Terrestrial Laser Scanner with an Emphasis on Reducing Occlusions. *In: The Photogrammetric Record* 31 (2016), Heft 156, S. 374-393. <https://doi.org/10.1111/phor.12162>.
- [7] *Jia, F.; Lichti, D.D.*: A Model-Based Design System for Terrestrial Laser Scanning Networks in Complex Sites. *In: Remote Sensing* 11 (2019), Heft 15, S. 1749. <https://doi.org/10.3390/rs11151749>.
- [8] *Kim, M.-K.; Li, B.; Park, J.-S. et al.*: Optimal locations of terrestrial laser scanner for indoor mapping using genetic algorithm. *In: IEEE (Hrsg.): The 2014 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS 2014)*, Gwangju, South Korea, 2014 - 2014, S. 140-143.
- [9] *Biswas, H.; Bosché, F.; Sun, M.*: Planning for Scanning Using Building Information Models: A Novel Approach with Occlusion Handling. *In: Malaska, M.; Heikkilä, R. (Hrsg.): Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015), Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC), Oulu, Finland, 2015.
- [10] *Zhang, C.; Kalasapudi, V.S.; Tang, P.*: Rapid data quality oriented laser scan planning for dynamic construction environments. *In: Advanced Engineering Informatics* 30 (2016), Heft 2, S. 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.004>.
- [11] *Latimer, E.; Latimer, D.; Saxena, R. et al.*: Sensor space planning with applications to construction environments. *In: : Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE Operations Center, New Orleans, LA, USA, 2004, 4454-4460 Vol.5.
- [12] *Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.*: Optimizing terrestrial laser scanning measurement set-up. *In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-5/W12* (2011), S. 127-132. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-127-2011>.
- [13] *Giorgini, M.; Marini, S.; Monica, R. et al.*: Sensor-Based Optimization of Terrestrial Laser Scanning Measurement Setup on GPU. *In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 16 (2019), Heft 9, S. 1452-1456. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2899681>.
- [14] *Chen, M.; Koc, E.; Shi, Z. et al.*: Proactive 2D model-based scan planning for existing buildings. *In: Automation in Construction* 93 (2018), S. 165-177. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.010>.
- [15] *Ahn, J.; Wohn, K.*: Interactive scan planning for heritage recording. *In: Multimedia Tools and Applications* 75 (2016), Heft 7, S. 3655-3675. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2473-0>.
- [16] *Blaer, P.S.; Allen, P.K.*: View planning and automated data acquisition for three-dimensional modeling of complex sites. *In: Journal of Field Robotics* 26 (2009), 11-12, S. 865-891. <https://doi.org/10.1002/rob.20318>.
- [17] *Jia, F.; Lichti, D.*: A comparison of simulated annealing, genetic algorithm and particle swarm optimization in optimal first-order design of indoor TLS networks. *In: ISPRS*

- Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W4 (2017), S. 75-82. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-75-2017>.
- [18] *Maar, H.; Zogg, H.-M.*: WFD – Wave Form WDF - Wave Form Digitizer Technology – White paper. Leica Geosystems AG, 2021, <https://leica-geosystems.com/about-us/content-features/wave-form-digitizer-technology-white-paper>.
- [19] *Lichti, D.D.; Cooper, J.; Jia, F. et al.*: Object positional uncertainty modelling in 2D view-point planning. *In: Automation in Construction 156* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105125>.
- [20] *Kavulya, G.; Jazizadeh, F.; Becerik-Gerber, B.*: Effects of Color, Distance, and Incident Angle on Quality of 3D Point Clouds. *In: Zhu, Y. (Hrsg.): Computing in Civil Engineering* (2011). American Society of Civil Engineers, Miami, Florida, United States, 2014, S. 169-177.
- [21] *Soudarissanane, S.; Lindenbergh, R.; Menenti, M. et al.*: Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points. *In: : Proceedings ISPRS workshop laserscanning 2009*. ISPRS, S. 183-188.
- [22] *buildingSMART International Limited*: IFC 4.3.2 Documentation, [https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_3/](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_3/) [Zugriff am: 08.11.2024].

# Prospektive Lebenszyklusanalyse des deutschen Gebäudebestands

Nathalie Glenn

Institut für Tragwerksplanung, TU Graz

*Abstract: Die aktuelle Lebenszyklusbewertung nutzt Daten aus bestehenden oder älteren Daten, um die Entwicklung der Umweltauswirkungen über einen Zeitraum von fünfzig bis hundert Jahren zu prognostizieren. Deswegen wird in dieser Studie eine Rahmenbeschreibung mit einem schrittweisen Ansatz für Szenario basierte Inventarmodellierung, bekannt als SIMPL-Ansatz, für eine prospektive Lebenszyklusbewertung entwickelt. Ein deutsches Gebäudebestandsmodell, das auf dem IOER-Materialkataster der Gebäude in Deutschland basiert, wird verwendet, um eine Bestandsaufnahme zu erstellen und als Fallstudie eine Reihe von Szenarien zur Einhaltung dieser Ziele zu berechnen. Diese Ergebnisse werden helfen, zukünftige Szenarien zu testen, um zu sehen, ob alternative Materialauswahl und weitere Faktoren dazu beitragen können, die Ziele des Pariser Abkommens für 2045 zu erreichen.*

*Forschungslücke: Die Komplexität des Gebäudebestands, die sich aus der Verwendung unterschiedlicher Materialien ergibt, stellt eine erhebliche Herausforderung für die Durchführung einer Lebenszyklusbewertung dar. Am wichtigsten ist, dass Lebenszyklusanalysen sinnvolle Orientierung für Entscheidungen bieten. Daher müssen bedeutende zukünftige Szenarien wie Klimawandel, der zukünftige Energiemix und das Innovationspotenzial von Baumaterialien in das Berechnungsmodell einbezogen werden. Ziel dieser Studie ist es, einen Beitrag zum Bereich der prospektiven Lebenszyklusbewertungsmethoden zu leisten, indem eine große Datenbank, wie etwa ein Gebäudebestand, genutzt wird, um Lösungswege für unmittelbare Herausforderungen zu formulieren.*

*Methode: Basierend auf einer Literaturrecherche werden der aktuelle Forschungsstand im Bereich kontextspezifischer Bewertungsmethoden für lebenszyklusbezogene Umweltauswirkungen von Bauteilen, die Auswirkungskriterien und die geeigneten Methoden zur Überprüfung der Ergebnisse ermittelt. Fallstudien werden durchgeführt und analysiert, um die Auswirkungen auf den deutschen Gebäudebestand zu bestimmen. Das Potenzial und die Grenzen einheimischer Baumethoden und innovativer Materialien als Beitrag zum nachhaltigen Bauen werden untersucht.*

*Bewertung: Die Ergebnisse werden zusammengefasst und dokumentiert, um ihre Bedeutung und Anwendbarkeit zu bewerten. Eine kritische Überprüfung ist erforderlich, um die technische und wissenschaftliche Angemessenheit der verwendeten Methoden festzustellen und festzustellen, ob die gesammelten Daten ausreichen, um die Ziele der Studie zu erreichen. Es ist auch wichtig, etwaige Einschränkungen und Einschränkungen zu identifizieren, die den Studienfortschritt behindern könnten. Dies wird in der Regel durch die Implementierung einer Sensitivitätsanalyse erreicht, ergänzt durch eine Unsicherheitsanalyse, die durch eine Monte-Carlo-Simulation erleichtert wird.*

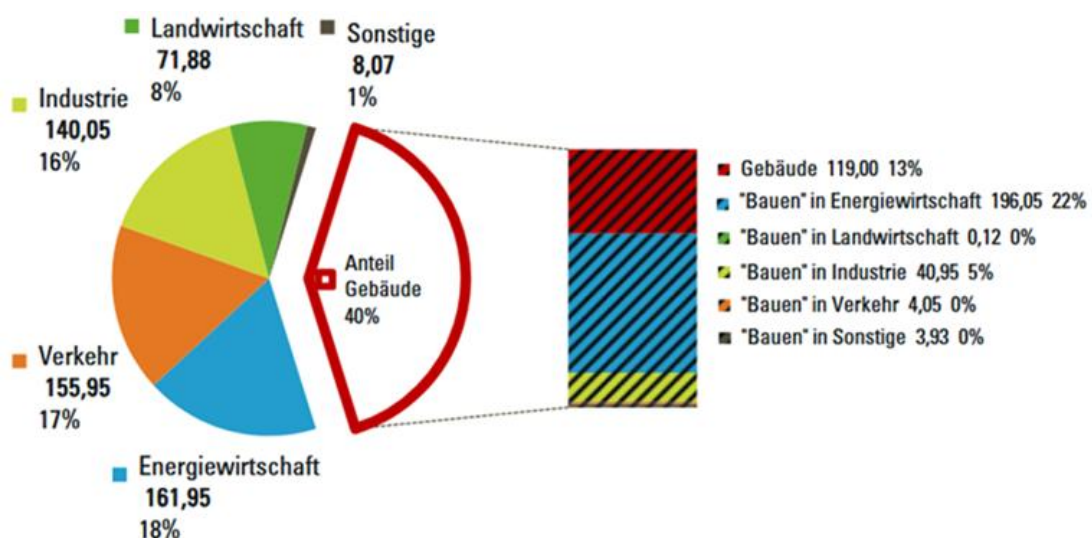
## 1. Prospektive Lebenszyklusanalyse des deutschen Gebäudebestands

### 1.1. Problemstellung

Zahlreiche Studien haben wiederholt betont, dass indigene und traditionelle Baumethoden gut an das vorherrschende Klima und die lokale Lebensweise angepasst zu sein scheinen. Die Vielfalt dieser Bauansätze reicht von passiven Designarten, ökologischen und lokalen Materialentscheidungen, Prinzipien und Merkmalen zur Erreichung eines gesunden Innenraumklimas bis hin zu nachhaltiger Designanalyse. Da das Bewusstsein für die negativen Umweltauswirkungen insbesondere von Beton-, Stahl- und Aluminiumarchitektur wächst, steigt das Interesse an alternativen Bau- und Renovierungsmethoden. In Deutschland werden die meisten Gebäude nicht mehr mit einer traditionellen Baukultur errichtet. Um Strategien zur Emissionsverminderung im Bausektor zu entwickeln ist es wichtig, den Bestand genau zu erfassen und Konzepte von zukünftigen Materialkonzepten, Energieeinsatz, Umgang mit Abriss und Alt-Material und deren Interaktion genau zu erfassen.

Eine Bestands-Bilanzierung wurde bereits mit archetypischen Gebäuden und Materialgruppen, die durch das deutsche Materialkataster identifiziert wurden, berechnet. Das deutsche Materialkataster erfasst und verwaltet vorhandene Informationen über die Materialien in Gebäuden, die auf den bereits bestehenden 3D-Stadtmodellen kartiert wurden. Zahlen und Daten zum Stand der durch die Bauindustrie verursachten Emissionen zeigen, dass die gesamte Bauindustrie, einschließlich Materialproduktion, Bauwesen, Betriebsphase und Abriss, erheblich zu CO<sup>2</sup>-Emissionen beiträgt. Eine lokale deutsche Studie aus dem Jahr 2020 hat gezeigt, dass 40 % (362 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) der deutschen THG-Emissionen durch die Produktion, den Bau, die Modernisierung, Nutzung und den Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht werden. 75 % des THG-Fußabdrucks des Tätigkeitsfeldes "Bau und Nutzung von Gebäuden" (297 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente) und somit 33 % der nationalen THG-Emissionen wurden durch die Nutzung und den Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden verursacht [1][2][3][4][5][6][7].

Abbildung 7: Lokale deutsche Kohlendioxidemissionen [7]



THG-Emissionen in Mio t CO<sub>2</sub>-Äquivalent - Σ 902,0

Neben den Emissionen ist Abfall eine weitere Herausforderung für die Bauindustrie. Die Bauindustrie an sich und der von ihr verursachte Abriss verursachen weltweit 35 % des Abfalls

auf Deponien und verbrauchen bis zu 50 % der Primärmaterialien. Ihr aktueller Zustand ist eine lineare Wirtschaft. Weil die Begrenzung des Temperaturanstiegs um 1,5–2,0 °C entsprechend des Pariser Abkommens erfüllt werden soll, [8][9][10] [11] werden Strategien zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung für Gebäudebestand zunehmend erforscht und veröffentlicht. Diese Auswirkungen haben globale Bedeutung im Hinblick auf zukünftige Berechnungen im Zusammenhang mit Urbanisierung und Bevölkerungswachstum [12].

## **1.2. Forschungslücke**

Es fehlen generell Forschungsdaten zur Lebenszyklus-Analyse im Bauwesen. Wenn Gebäude oder Bauteile bewertet werden, unterscheidet sich häufig die funktionale Einheit oder die Systemgrenze stark, was zu unvergleichbaren Ergebnissen führt. Die Ergebnisse lassen sich zudem sehr schwer im Kontext einordnen, etwa länderspezifische Emissionszahlen, da die Maße sehr stark variieren. Die Europäische Norm DIN EN 15978 [13], die im Allgemeinen für die Nachhaltigkeit von Gebäuden gilt, hat bestimmte Wirkungskategorien und empfiehlt die Verwendung von Umweltproduktdeklarationen [14]. Sie besagt aber auch, dass Informationen auch aus anderen Quellen bezogen werden können, sofern sie nicht verfügbar sind, was eine vage Annahme ist. Ein offensichtliches Problem tritt auf, wenn Inventare und Berechnungen für alte Baumaterialien vorgesehen sind, die in EPD-Datenbanken nicht verfügbar sind, weil sie nicht mehr hergestellt werden oder, im Vorausblick, bisher nicht industriell verfügbar sind. Mehrere europäische Länder haben bereits Inventare von Gebäudebestandsmodellen entwickelt, um landesweite Auswirkungen zu berechnen, um Lebenszyklusanalysen für ihre Kernfunktion zu nutzen, nämlich die Bewertung der multidirektionalen Entwicklung und der damit verbundenen Entscheidungen. Die Idee, einen gesamten Gebäudebestand zu bewerten, basiert auf technologischer Entwicklung. In Deutschland werden der Gebäudebestand und die verwendeten Materialien durch das Materialkataster des Leibnitzer Instituts erleichtert. Ihr Datensatz liefert materielle Indikatoren für den Gebäudebestand in Deutschland im Jahr 2022. Sie umfasst 44 Baustoffgruppen und eine zusammengefasste Version, die hinsichtlich der verwendeten Mengen und der daraus resultierenden Treibhausgaspotenziale analysiert wurden. Die Daten wurden auf Gebäudeebene in ganz Deutschland erhoben. Insbesondere wurde der Datensatz '3D Building Metrics Germany 2022' (3DBM-DE) verwendet, der Bauflächen und geometrische Parameter aus dem 3D-Baumodell Deutschlands (LoD2-DE) ableitet. Basierend auf der Verfügbarkeit dieser großen Datensätze können zukünftige Szenarien angewendet und bewertet werden [15][16][17][18].

### **Prospektive Lebenszyklusbewertung bei Bestandsmodellen**

Die Komplexität eines Gebäudebestands, verursacht durch die Masse verschiedener Werkstoffe, stellt eine Herausforderung für eine Ökobilanz dar. Vor allem sollte eine Ökobilanz sinnvolle Leitlinien für verschiedene Entscheidungsfindungen bieten. Ein prospektiver Lebenszyklusbewertungsansatz umfasst wichtige Wegweiser Kriterien wie den Klimawandel, den zukünftigen Energiemix und das Potenzial für Innovationen bei Baumaterialien. Dies unterstreicht die Bandbreite der Auswirkungen, die zukünftige Entscheidungen bezüglich der Wahl von Energie oder Materialien haben können, wenn man sie im Vergleich zu den von Wissenschaftlern vorhergesagten Hintergrund Szenarien betrachtet. Diese Dissertation konzentriert sich auf methodische Rahmenwerke zur Bewertung und Darstellung der Umweltleistung von Gebäuden mittels einer prospektiven Lebenszyklusbewertung, um entscheidende

Einflussfaktoren hierzu zu identifizieren und auch Fallbeispielberechnungen durchzuführen. Dazu ist es wichtig, die Entwicklung von Vordergrundszenarien, um potenzielle Entwicklungen im Gebäudebestandsmodell abzudecken, zu betreiben. Um diese Eingaben zu steuern, wird ein SIMPL-Ansatz verwendet, um relevante Faktoren in diesem Zusammenhang zu bestimmen [19]. Für die Hintergrundmodelle muss entschieden werden, welche Modelle verwendet werden. "Premise" ermöglicht die Ausrichtung von Lebenszyklusinventaren innerhalb der Ecoinvent-Datenbank, entweder unter Verwendung eines "Cut-off"- oder "Consequential"-Systemmodells, um die Ergebnisse von Integrated Assessment Models (IAMs) wie REMIND, REMIND-EU, IMAGE oder TIAM-UCL abzugleichen [20][21][22]. Dies ermöglicht die Erstellung von Lebenszyklus-Inventardatenbanken unter zukünftigen Entwicklungsszenarien aus diesen Modellen. Im Fall der Modellierung eines Gebäudebestands und möglicher zukünftiger Entwicklungen in Gebäuden, Gebäudemanagement und Bau-Abriss-Szenarien sollte ein Modell mit starkem Fokus auf Energieanalyse und EU-Politik in Deutschland wie REMIND-EU betrachtet werden. Andererseits legt das IMAGE-Modell mehr Wert auf Klima-Ökosystem-Interaktionen mit Auswirkungen in den Kategorien Landnutzung und Biodiversität. Der Fokus dieses Modells ist anders, aber nicht weniger wichtig. Die Hintergrundmodelle sind etablierte wissenschaftliche Modelle zukünftiger Entwicklungen. Die Vordergrundszenarien haben eine explorative, prädiktive oder normative Natur, abhängig von den zukünftigen Optionen, die untersucht werden. Bis heute wurden viele Auswirkungen im Lebenszyklus von Gebäuden durch den betrieblichen Energieverbrauch verursacht. Mit umweltfreundlicheren Energiequellen oder einer gebäudeeigenen Energieversorgung gewinnen auch andere Auswirkungsquellen an Bedeutung. Zukünftige energiebezogene Auswirkungen können mit einem Hintergrundmodell oder einem Vordergrundmodell im Fall einer einzelnen Energiequelle bewertet werden. Baumaterialien sollten in prognostizierten Berechnungen zur Umsetzung technologischer Fortschritte in Baumaterialien wieder in den Fokus kommen, sei es auf traditionellen Methoden oder neuen Erfindungen. Neu erhobene Daten zum Bausektor in Deutschland zeigen, dass die beabsichtigte Emissionsreduktion in dieser Phase nicht erreicht werden kann. Das Ziel der CO<sub>2</sub>-Neutralität wird nicht erreicht, wenn im Bausektor nicht größere und gezieltere Anstrengungen unternommen werden. Dazu gehört auch die Untersuchung wichtiger Faktoren neben der Energie oder die Zugabe von Recyclingmaterial zu Beton [23][24][19][22][25][26][27][28][29].

### **1.3. Forschungshypothese**

Um Konzepte zur signifikanten Reduzierung verschiedener Emissionen in den Bereichen bestehender Gebäude, Gebäudeverwaltung, Renovierung und Bau zu entwickeln, müssen Alter, Zustand und Beschaffenheit des Gebäudebestands zunächst erfasst werden, um die aktuellen Emissionsstatuten zu bewerten. In Deutschland gibt es insgesamt 51,6 Millionen Gebäude mit insgesamt 20,8 Milliarden Tonnen Baumaterialien. Je nach Alter des Gebäudes wurden 44 Baumaterialgruppen identifiziert, die aus 130 verschiedenen Baumaterialien bestehen. Auf dieser Grundlage wurden Rohstoffe für die Baumaterialien identifiziert, Abfallkategorien zugewiesen und materialinduzierte Emissionen können bestimmt werden. Ebenso wurden Bau- und Abrissaktivitäten statistisch seit 1995 erfasst und bis 2050 prognostiziert. Auch Verbrauchszahlen für den Energieverbrauch im Bausektor sind verfügbar, ebenso wie Daten zu den in Gebäuden installierten Heiz- und Kühlsystemen, wodurch der Verbrauch verschiedener Energiequellen mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden kann. Insbesondere in

Deutschland werden fossile Brennstoffe langfristig möglicherweise nicht mehr zur Heizung genutzt, und auch der Energiemix wird sich durch das Auslaufen von Braunkohle verändern. Mit Unterstützung statistischer Daten zum Gebäudebestand in Deutschland und zum damit verbundenen Energieverbrauch kann eine Bestandsaufnahme des Gebäudebestands erstellt werden[17][30].

#### Forschungsfragen

F1: Wie entwickeln sich die Ergebnisse der verschiedenen Wirkungskategorien (laut EF 3.1) mit den mit REMIND-EU und IMAGE modifizierten Hintergrunddatenbanken in einem besten, schlechtesten und mittleren Szenario?

F2: Welche relevanten Schlüsselfaktoren, die mit dem SIMPL-Ansatz identifiziert wurden, werden in einem Vordergrund-Szenario modelliert?

F3: Kann das Ziel der CO<sup>2</sup>2045 mit einer Kombination aus Schlüsselfaktoren und Hintergrundscenarien erreicht werden?

F4: Wie interagieren Schlüsselfaktoren miteinander und welche Auswirkungen und Abwägungen haben diese Wechselwirkungen?

### **1.4. Forschungsziel**

Die aktuelle Praxis in LCA nutzt aktuelle oder ältere Daten in seinen Vorder- und Hintergrundsystemen, um die Entwicklung der Umweltauswirkungen in fünfzig bis hundert Jahren zu prognostizieren. Die Studie zielt darauf ab, eine maßgeschneiderte Rahmenbeschreibung für Gebäude zu entwickeln, wobei der deutsche Gebäudebestand als Fallstudie genutzt wird, um die Datenvielfalt eines prospektiven Rahmens und die daraus resultierenden Perspektiven zu zeigen, die Entscheidungsfindung unterstützen können. Das formulierte Ziel hierbei ist, die CO<sup>2</sup> Neutralität 2045 zu erreichen.

### **1.5. Relevanz**

Die Relevanz von Lebenszyklusbewertungen für den Gebäudebestand ist in den letzten Jahren erheblich zugenommen, da die Bauindustrie zunehmend Wert auf Nachhaltigkeit und Zirkularität legt. In Deutschland wird eine Verpflichtung zu Lebenszyklusbewertungen für Gebäude über 1000 m<sup>2</sup> und für öffentliche Gebäude eingeführt. Entscheidungsträger müssen jedoch so schnell wie möglich Zugang zu fundierten Gesamtbetrachtungsdaten haben, da Veränderungen im Bausektor lange im Voraus geplant werden müssen und ihre Auswirkungen erst nach einer Zeitverzögerung sichtbar werden.

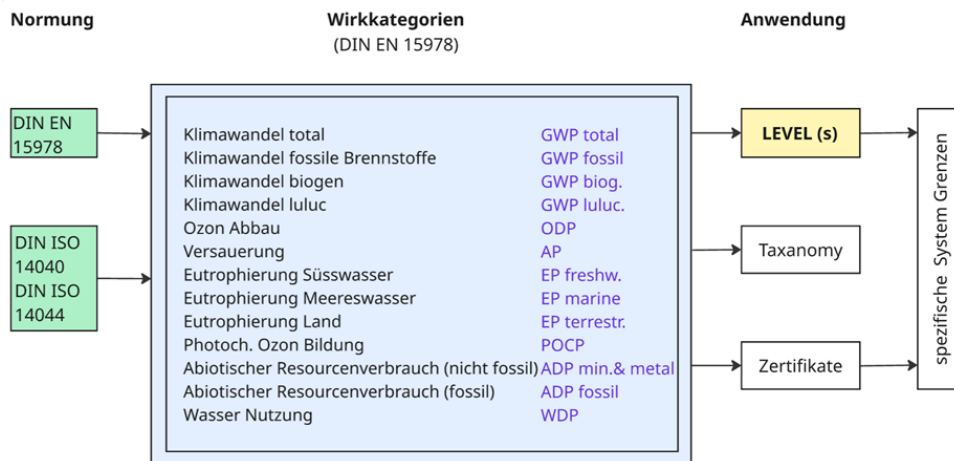
## **2. Grundlagen**

### **2.1. Europäischer Rahmen für Ökobilanzen im Bauwesen und Gebäude**

Ein existierender europäischer Ansatz zur Bewertung von Gebäuden ist der Level(s)-Rahmen. Dieser Rahmen konzentriert sich auf sechs Makroziele, darunter Schadstoffe, Ressourceneffizienz, Wasserverbrauch, Anpassung an den Klimawandel, Lebenszykluskosten und Gesundheitsindikatoren. Die Lebenszyklusbewertung ist ein Instrument, das zur Bewertung der Schadstoff-Emissionen, Effizienz und Wasserverbrauch verwendet wird. Das Rahmenwerk

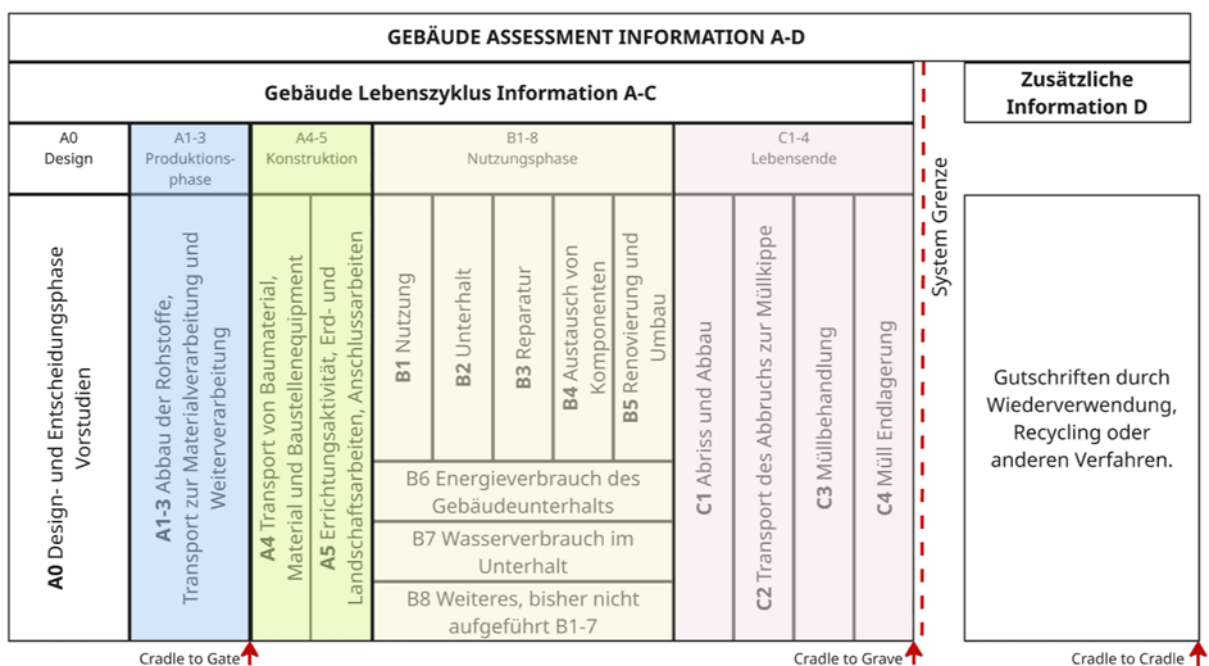
verwendet eine spezifische Referenz und eine funktionale Vergleichseinheit zwischen Gebäudeentwürfen oder Projekten. In Level(s) werden die Ergebnisse auf die Nutzung von 1 m<sup>2</sup> nutzbarer Bodenfläche des jeweiligen Gebäudetyps und der Funktion normalisiert, gemittelt für ein Jahr eines Referenzstudienzeitraums von 50 Jahren. Ein Zweck dieser Beschränkungen ist es, Gebäude ähnlicher Funktion vergleichbar zu halten. Der europäische DIN-Standard für die Lebenszyklusbewertung von Gebäuden ist im Rahmen der Level(s) enthalten. Das folgende Diagramm zeigt die Beziehungen zwischen den DIN-Standards und dem Level(s)-Rahmen [31][13].

Abbildung 8: Standards, Wirkkategorien und deren Anwendung



Die Lebenszyklusbewertung wird nach internationalen Standards geregelt. Der Berichts- und Quantifizierungsprozess ist gemäß ISO 14064 – Treibhausgasbuchführung und -verifikation geregelt. Laut dem EN 15978-Standard umfassen die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes Produktphase, Bauphase, Nutzungsphase und des Lebensendes. Abbildung 3 zeigt die Stufen und Module des Gebäudelebenszyklus gemäß DIN EN 15978, einschließlich einer Vorstufe und dem Modul D, das außerhalb der Systemgrenze liegt [32][33][34][13].

Abbildung 9: Lebenszyklusphasen eines Gebäudes nach EN 15978



Lebenszyklusanalysen in der Bauindustrie bewerten üblicherweise die Phasen A bis C, wie im obigen Schema gezeigt. Aus Statistiken über Bauabfälle auf Deponien geht hervor, dass Eigenschaften zur Weiterverwertung von Bauteilen und Materialien wichtig sind, um die negativen Umweltauswirkungen des Bausektors zu verändern[35].

## 2.2. Prospektive Lebenszyklusbewertung

Ein prospektiver LCA schätzt *Zukunft* Lebenszyklus-Umweltauswirkungen anhand von Szenarien. Das bedeutet, dass neben dem Umfang der Studie und der Zielsetzung auch mögliche zukünftige Entwicklungen, die die Ergebnisse des LCA beeinflussen, berücksichtigt werden. Prospektive LCA versucht, Umweltauswirkungen und Dienstleistungen, die durch zukünftige Technologien oder Entwicklungen bereitgestellt werden, vorherzusehen. Ein Szenario in diesem Zusammenhang ist eine Schätzung, wie sich die Zukunft entwickeln könnte, basierend auf einem kohärenten und intern konsistenten Satz von Annahmen. Forscher haben Softwarepakete entwickelt, die bestehende Lebenszyklusdatenbanken entsprechend den in der IPCC-Forschung beschriebenen Szenarien verändern. Für eine prospektive Lebenszyklusbewertung ist die am häufigsten verwendete Software der Activity Browser auf Basis von Brightway. Das Plugin Premise ermöglicht Lebenszyklus-Inventardaten innerhalb der Ecoinvent-Datenbank, entweder unter Verwendung eines "Cut-off"- oder "Consequential"-Systemmodells, um die Ergebnisse mit integrierten Bewertungsmodellen (IAMs) zu modifizieren. Diese Modelle sind REMIND, IMAGE und TIAM-UCL. Dies ermöglicht die Erstellung von Lebenszyklus-Inventardatenbanken und in zukünftigen Szenarien bis zum Jahr 2100 mit einer Bandbreite von Ergebnissen entsprechend diesen Szenarien. Im Allgemeinen werden szenariobasierte Lebenszyklusbewertungen auch dynamische Lebenszyklusbewertungen oder ex-ante-Lebenszyklusbewertung genannt, die sich auf aufkommende Technologien konzentriert [36][37][38][39][40][21][20][22].

## 2.3. Das deutsche Materialkataster der Gebäude

Um eine prospektive Lebenszyklusbewertung für einen deutschen Gebäudebestand durchzuführen, liefert der Deutsche Materialkataster der Gebäude den Basisdatensatz. Entwickelt vom Leibniz-Institut für ökologische Stadt- und Regionalentwicklung (IOER), ist das Deutsche Materialkataster der Gebäude eine zentrale Datenbank, die Daten zu den Arten und Mengen von Baumaterialien im deutschen Gebäudebestand liefert. Deutschlands 51,6 Millionen Gebäude enthalten rund 20,8 Milliarden Tonnen Baumaterialien. Beton ist das dominierende Baumaterial in diesem 'Materiallager' und macht 46 Prozent aus, gefolgt von Sandkalkziegeln und -ziegeln, die jeweils knapp 10 Prozent ausmachen. Erneuerbare Materialien wie Holz, Schilf und Stroh machen nur etwa ein Prozent des Gesamtgehalts aus. Es können auch Aussagen über die Menge an Treibhausgasen gemacht werden, die bei der Herstellung von Baumaterialien entstehen. Auf den gesamten Gebäudebestand in Deutschland im Jahr 2022 extrapoliert, enthalten die verwendeten Materialien etwa 2,86 Milliarden Tonnen CO<sup>2</sup>-Äquivalent, was der Gesamtmenge an CO<sup>2</sup> entspricht, das Deutschland in vier Jahren ausstößt. In Verbindung mit Informationen über regionale Abrisse und Neubauaktivitäten in Gemeinden ermöglicht das Materialregister die Abschätzung, welches Material beim Abriss bestehender Gebäude für das Recycling verfügbar ist und welche Materialanforderungen für Neubauten und Sanierungen abgedeckt werden könnten. Die Mengen des erwarteten Bauabfalls können ebenfalls anhand des Materialregisters bestimmt werden [17].

Das Materialkataster Deutschland basiert auf dem LoD2-Datensatz der Bundesregierung, der rund 56 Millionen Bauwerke umfasst, von denen rund 51,6 Millionen als Gebäude klassifiziert sind. Die Modellierung auf Gebäudeebene wird mit Gebäudevolumen implementiert, das von 3D-Baumodellen abgeleitet ist. Dies schließt jedoch unterirdische Gebäudeabschnitte aus. Ein Gebäude-Typologie Ansatz erleichtert die Differenzierung innerhalb des Gebäudebestands und typisiert Gebäude sowie entsprechende typspezifische Materialindikatoren. Die Kategorisierung von Gebäuden basiert im Wesentlichen auf den im LoD2-Datensatz gezeigten Gebäudefunktionen und einem komplexen geometrischen Filter. Dies unterscheidet zwischen Ein- oder Zweifamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern und einer Vielzahl von Nichtwohngebäuden. Die Bautypen sind weiter nach Altersgruppen nach Baujahr unterteilt [4][17].

#### **2.4. Forschungsstand (Zusammenfassung)**

Ein auffälliger Punkt in der bisher durchgeführten Literaturrecherchen war, dass die Suchen ähnliche oder überlappende Ergebnisse lieferten, obwohl sie deutlich unterschiedlich formuliert waren. Die Recherche 1 war formuliert: "Europäische Modelle des regionalen Gebäudebestands und betrieblicher Energieverbrauch". Suche 2 war formuliert: "Prospektive Lebenszyklusbewertung und Gebäude-, Bau- und Gebäudebestandsmodell".

Literaturrecherche 1:

Die Recherche beschränkte sich auf die letzten fünf Jahre und war auf Publikationen zu Energie, Bauwesen und Umwelt eingegrenzt. Es wurde nur Originalforschung ausgewählt, keine rein literaturbasierte Forschung. ScienceDirect lieferte 302 Forschungsarbeiten. Nach einer Titelüberprüfung wurden 53 Veröffentlichungen davon weiter untersucht. 7 weitere Veröffentlichungen wurden aus Google Scholar und anderen Quellen berücksichtigt. Die Zahl scheint niedriger zu sein, da Google Scholar oder Scopus ebenfalls Ergebnisse von ScienceDirect zeigen. Nach Prüfung der Abstracts wurden 23 Forschungsarbeiten als relevant erachtet. Nach dem Lesen des vollständigen Artikels wurden 13 Artikel ausgewählt, 7 weitere wurden durch ein Schneeballsystem aus Quellenangaben dieser Artikel hinzugefügt.

Literaturrecherche 2:

Nach Anwendung der gleichen Einschränkungen wie bei der ersten Suche ergab diese Suche 437 Treffer auf ScienceDirect. Bei Google Scholar ergab die Suche 553 Titel. Nach der Vorwahl der Titel wurden 43 Beiträge ausgewählt, um die Zusammenfassungen zu lesen. Nach der vollständigen Lektüre wurden 22 Artikel ausgewählt, 12 weitere Arbeiten wurden im Schneeballsystem als relevant identifiziert.

Die Ergebnisse zeigen ein großes Maß an Vernetzung in diesem Bereich. Die Recherchen konnten ähnliche Ansätze zur Analyse landesweiter Baubestände aus den Niederlanden, Dänemark, der Schweiz und Österreich finden.

Die Basisforschung zeigt, dass es Möglichkeiten gibt, zukünftiges Potenzial und Entwicklungen im Bauwesen mithilfe einer prospektiven Lebenszyklusbewertung in Kombination mit den Forschungsergebnissen zu quantifizieren, die zu einem deutschen Materialkataster der Gebäude als Inventardatenbank geführt haben, selbst wenn Teile von unterirdischen Gebäuden negiert werden, weil sie vom geometrischen Modell nicht erzeugt werden können. Dennoch werden die Prognosen und die Aspekte, auf denen der Gebäudebestand untersucht wird, wichtige Faktoren sein, da die Bauindustrie eng mit anderen Branchen wie dem Energiesektor

und dem Transport verbunden ist. Letztlich spielen persönliche Entscheidungen in Bezug auf Quadratmeter pro Kopf, sowohl in Wohngebäuden als auch in Arbeitsplätzen, ebenfalls eine entscheidende Rolle dabei, ob Klimaziele in Deutschland erreicht werden können.

Die folgende Hauptuntersuchung soll die Annahmen aus der Recherche mit Zahlen belegen oder weiter modifizieren.

## Literatur

- [1] A. T. Nguyen, N. S. H. Truong, D. Rockwood und A. D. Tran Le, "Studies on sustainable features of vernacular architecture in different regions across the world: A comprehensive synthesis and evaluation," *Frontiers of Architectural Research*, Jg. 8, Nr. 4, S. 535–548, 2019, doi: 10.1016/j.foar.2019.07.006.
- [2] Langmaack et al. "Climate and employment impacts of sustainable building materials in the context of development cooperation." Zugriff am: 9. November 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.giz.de/de/downloads/giz2021-en-climate-and-employment-sustainable-building-materials.pdf>
- [3] A. Ilki, D. Çavunt und Y. S. Çavunt, Hg. *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient: Proceedings of the fib Symposium 2023 - Volume 1*, 1. Aufl. (Lecture Notes in Civil Engineering 349). Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer, 2023.
- [4] IÖR-Research Data Centre (IÖR-FDZ), "Research Data Centre of the Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development," 2024, doi: 10.17616/R31NJNL7. Zugriff am: 20. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ioer-fdz.de/datenangebot>
- [5] R. Voshage, K. Gruhler, R. Hecht, T. Krüger und R.-U. Syrbe, *Das IÖR-Forschungsdatenzentrum für raumbezogene Nachhaltigkeitsforschung (IÖR-FDZ)*. Zenodo, 2023. Zugriff am: 20. Oktober 2025.
- [6] United Nations Environment Programme, Hg. *Global Status Report for Buildings and Construction*. Nairobi, 2022.
- [7] Ramseier und Frischknecht, "Environmental Footprint of Buildings in Germany," 2020. Zugriff am: 20. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- [8] Kabirifar, Mojtahedi, Wang und Tam, "Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 263, S. 121265, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121265.
- [9] O. Larsen. "World Counts: State of solid waste." Zugriff am: 21. Oktober 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.theworldcounts.com/challenges/planet-earth/state-of-the-planet/solid-waste>
- [10] Hammadhu Haither und Anjali, "Circular Economy in Construction Sector—a Guideline for Policy Makers from Global Perspective," *Circ.Econ.Sust.*, Jg. 4, Nr. 2, S. 1285–1313, 2024, doi: 10.1007/s43615-023-00321-x.
- [11] UN Climate Change Conference, *Paris Agreement*, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

- [12] Gu et al., "Major Trends in Population Growth Around the World," *China CDC Wkly*, 2021. doi: 10.46234/ccdcw2021.160. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8393076/>
- [13] *Sustainability of Construction Works—assessment of environmental performance of buildings—calculation method*, DIN EN 15978: 2012.
- [14] *Environmental labels and declarations –Type III environmental declarations –Principles and procedures*, DIN EN ISO 14025, 2010.
- [15] N. Alaux, B. Schwark, M. Hörmann, M. Ruschi Mendes Saade und A. Passer, "Assessing the prospective environmental impacts and circularity potentials of building stocks: An open-source model from Austria (PULSE-AT)," *J of Industrial Ecology*, Jg. 28, Nr. 6, S. 1435–1448, 2024, doi: 10.1111/jiec.13558.
- [16] Yang, Hu, Tukker, Zhang, Huo und Steubing, "A bottom-up dynamic building stock model for residential energy transition: A case study for the Netherlands," *Applied Energy*, Jg. 306, S. 118060, 2022. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118060. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921013507>
- [17] R. Schinke, J. Hennersdorf, K. Gruhler, U. Griebach und G. Schiller, *Material Cadastre of Buildings in Germany 2022 (matcad2022, adm2022)*. ioerDATA, doi: 10.71830/V2STEU.
- [18] Y. Che et al., *3D-GloBFP: the first global three-dimensional building footprint dataset*. Zenodo, doi: 10.5281/ZENODO.11391076.
- [19] S. Langkau et al., "A stepwise approach for Scenario-based Inventory Modelling for Prospective LCA (SIMPL)," *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 28, Nr. 9, S. 1169–1193, 2023, doi: 10.1007/s11367-023-02175-9.
- [20] Netherlands Environmental Assessment Agency. "IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment)." Zugriff am: 28. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: [https://models.pbl.nl/image/Welcome\\_to\\_IMAGE\\_3.3\\_Documentation](https://models.pbl.nl/image/Welcome_to_IMAGE_3.3_Documentation)
- [21] Potsdam Institute for Climate Impact Research. "REMIND - Regional Model of Investments and Development: - Version 2.1.0." Zugriff am: 28. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.pik-potsdam.de/research/transformation-pathways/models/remind>
- [22] University College London (UCL). "TIAM-UCL: Global model documentation." Zugriff am: 28. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: [https://www.ucl.ac.uk/energy-models/sites/energy\\_models/files/tiam-ucl-manual.pdf](https://www.ucl.ac.uk/energy-models/sites/energy_models/files/tiam-ucl-manual.pdf)
- [23] S. Bruhn, R. Sacchi, C. Cimpan und M. Birkved, "Ten questions concerning prospective LCA for decision support for the built environment," *Building and Environment*, Jg. 242, S. 110535, 2023, doi: 10.1016/j.buildenv.2023.110535.
- [24] Sacchi et al., "Prospective Environmental Impact Assessment (premise)," (A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models) *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Nr. 160, 2022, Art. Nr. 112311. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212200226x>
- [25] L. Baumstark et al., "REMIND2.1: transformation and innovation dynamics of the energy-economic system within climate and sustainability limits," *Geosci. Model Dev.*, Jg. 14, Nr. 10, S. 6571–6603, 2021. doi: 10.5194/gmd-14-6571-2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://gmd.copernicus.org/articles/14/6571/2021/>

- [26] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, *Integrated assessment of global environmental change with IMAGE 3.0: Model description and policy applications*. Den Haag, 2014. Zugriff am: 20. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/308545/pbl\\_2014\\_integrated\\_assessment\\_of\\_global\\_environmental\\_change\\_with\\_image\\_30\\_735.pdf](https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/308545/pbl_2014_integrated_assessment_of_global_environmental_change_with_image_30_735.pdf)
- [27] R. Sacchi *et al.*, "Prospective Environmental Impact Assessment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 160, S. 112311, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112311.
- [28] K. Skillington, R. H. Crawford, G. Warren-Myers und K. Davidson, "A review of existing policy for reducing embodied energy and greenhouse gas emissions of buildings," *Energy Policy*, Jg. 168, S. 112920, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.112920.
- [29] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, Hg., "Climate Action in Figures – Germany's current emission trends and climate action measures," Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, 2022. Zugriff am: 20. Oktober 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/Klimaschutz/climate-action-in-figures.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Publikationen/Klimaschutz/climate-action-in-figures.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [30] German Federal Network Agency. "Lignite phase-out." Zugriff am: 20. Oktober 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Kohleausstieg/start.html>
- [31] Dodd, Donatello und Cordella. "Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings." User Manual 1: Introduction to. Zugriff am: 13. November 2025. [Online.] Verfügbar: [https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM1\\_Introduction\\_to\\_Level%28s%29\\_v1.1\\_27pp.pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM1_Introduction_to_Level%28s%29_v1.1_27pp.pdf)
- [32] *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, ISO - International Organization for Standardization, 2021.: Technischen Komitee ISO/TC 207 „Environmental management“, DIN EN ISO 14040, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baunormenlexikon.de/norm/din-en-iso-14040/23365e08-6965-4788-a834-1f055230ed0c>
- [33] *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines: Technischen Komitee ISO/TC 207 „Environmental management“*, DIN EN ISO 14044, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.baunormenlexikon.de/norm/din-en-iso-14044/95e267aa-783c-4ea8-aea2-7441219a3576>
- [34] *Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements*, DIN EN ISO 14064-2, 2019.
- [35] United Nations Environment Programme. "Building Materials and the Climate: Constructing a New Future." [Online.] Verfügbar: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789280740646>
- [36] R. Arvidsson, M. Svanström, B. A. Sandén, N. Thonemann, B. Steubing und S. Cucurachi, "Terminology for future-oriented life cycle assessment: review and recommendations," *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 29, Nr. 4, S. 607–613, 2024, doi: 10.1007/s11367-023-02265-8.

- [37] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Hg., "IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland," 2023, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- [38] B. Steubing, D. de Koning, A. Haas und C. L. Mutel, "The Activity Browser — An open source LCA software building on top of the brightway framework," *Software Impacts*, Jg. 3, S. 100012, 2020, doi: 10.1016/j.simpa.2019.100012.
- [39] C. Mutel, "Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment," *JOSS*, Jg. 2, Nr. 12, S. 236, 2017, doi: 10.21105/joss.00236.
- [40] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 21, Nr. 9, S. 1218–1230, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.

# INGENIOUS QUIZZING

Tom Bender, Jonah Albes  
Hochschule Mainz

*Abstract: Künstliche Intelligenz (KI) hält zunehmend Einzug in die Hochschullehre, wird dort jedoch oft noch mit Zurückhaltung betrachtet. Mit INGenious Quizzing erprobt die Hochschule Mainz einen innovativen Ansatz, um das Potenzial von KI gezielt für die Erstellung formativer Assessments nutzbar zu machen. Ein interdisziplinäres Team entwickelt hierfür anpassbare Eingabemuster, die es Lehrenden ermöglichen, eigenständig KI-basierte Übungs- und Prüfungsaufgaben zu generieren. Die Prompts verbinden strukturierte Anweisungen mit didaktisch fundierten Schlüsselbegriffen und führen so zu qualitativ hochwertigen, lernzielorientierten Aufgabenformaten. Die mit einem Custom-GPT erzeugten Fragen lassen sich formatkonform exportieren und über standardisierte Schnittstellen in gängige Lernplattformen wie OpenOLAT, Moodle, OPAL oder ILIAS einbinden. Damit eröffnet INGenious Quizzing die Möglichkeit, Übungs- und Prüfungsaufgaben flexibel in unterschiedliche Lehrkonzepte zu integrieren und hochschulübergreifend nutzbar zu machen. Erste Evaluationen zeigen eine hohe Akzeptanz sowohl bei Lehrenden, die die Benutzerfreundlichkeit und Verlässlichkeit der Inhalte hervorheben, als auch bei Studierenden, die von einer größeren Aufgabenvielfalt und verbesserten Selbstlernchancen profitieren. Insgesamt verdeutlicht INGenious Quizzing, wie KI-basierte Systeme zur Effizienzsteigerung, Individualisierung und Qualitätsverbesserung in der Hochschullehre beitragen können.*

## 1. Einleitung

Lehrberichte der Studiengänge Bauingenieurwesen und Umwelttechnik an der Hochschule Mainz zeigen, dass Aufgaben zur Selbstüberprüfung bisher nur vereinzelt und unsystematisch erstellt werden [1]. Im Grundstudium besteht der Wunsch nach kurzen, klar abgegrenzten Übungsformaten, die den Einstieg in komplexe Fachinhalte erleichtern. Gleichzeitig berichten Lehrende von hohem Zeitaufwand und technischen Hürden bei der Umsetzung, was den Einsatz digitaler Formate erschwert. Eine Befragung von 34 Lehrenden bestätigte dieses Bild: 62 % nutzen keine Online-Tests in OpenOLAT, zeigten jedoch großes Interesse an Multiple Choice, numerischen und Lücken-text-Aufgaben, sofern Erstellung und Integration vereinfacht werden [2].

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein Lösungsansatz zur vereinfachten Erstellung von Testfragen erarbeitet. Diese Möglichkeit wird im folgenden Text erläutert.

## 2. Technische Umsetzung

### 2.1. Herausforderungen bei der automatisierten Aufgabenerstellung

Der zentrale technische Innovationskern dieser Idee liegt in der Entwicklung und Optimierung von Prompt-Vorlagen. Diese stellen strukturierte Grundlagen für den Custom-GPT dar, welche die KI anleiten, Aufgaben gezielt nach den Vorgaben der Lehrenden zu generieren.

Diese wurden im Bereich der numerischen Aufgabenstellungen im Bereich Bau-konstruktionslehre, Statik oder Werkstoffkunde getestet und weiterentwickelt.

Die zentrale Schwierigkeit liegt weniger in der reinen Menge, sondern in der Sicherung der didaktischen Qualität, inhaltlichen Plausibilität und eindeutigen Formulierung automatisch generierter Aufgaben. Besonders in den Ingenieurwissenschaften erfordern numerische Aufgaben eine präzise Steuerung von Parametern und Rechenwegen. Bei komplexen Berechnungs- und Bemesungsaufgaben ist eine schrittweise, thematische Gliederung entscheidend, um den Lernprozess zu unterstützen. Gleichzeitig können schon geringe Ungenauigkeiten bei der Generierung zu fehlerhaften oder missverständlichen Ergebnissen führen. Systeme müssen daher in der Lage sein, komplexe numerische Abhängigkeiten korrekt abzubilden und verlässliche Aufgaben zu erstellen.

Parallel dazu stellt die Akzeptanz aufseiten der Lehrenden eine weitere Hürde dar. Kenntnisse im Prompt-Engineering oder vertiefte Programmiererfahrung sind nicht in allen Fachbereichen vorhanden und stellen daher ein Hemmnis für die Integration künstlicher Intelligenz in die Erstellung von Beispielaufgaben dar. Hier setzt INGenious Quizzing an, indem es mit einer strukturierten Benutzerführung die Einstiegshürden niedrig hält.

### **2.2. Fragetypen**

Zu Beginn der Systementwicklung wurden die Fragetypen gängiger Lernplattformen auf ihre Umsetzbarkeit geprüft. Voraussetzung ist eine eindeutig überprüf-bare Lösung, wie sie bei Lückentexten oder numerischen Eingaben gegeben ist. Freitext- oder Zeichenaufgaben wurden ausgeschlossen, da keine Anbindung an ein KI-Modell zur automatischen Interpretation besteht.

Grundsätzlich stehen folgende Fragetypen in der Lernplattform OpenOLAT zur Verfügung:

- Single Choice;
- Multiple Choice;
- Drag & Drop;
- Numerische Eingabe;
- Lückentext;
- Kprim;
- Matrix;
- True / False;
- Reihenfolge;

Auf Basis einer Bedarfsanalyse unter den Lehrenden der HS Mainz konzentrierte sich die Entwicklung auf Single/Multiple Choice, Drag & Drop, Lückentext und numerische Eingaben.

Jedoch können weitere Fragetypen im Rahmen von zukünftigen Erweiterungen ergänzt werden.

### 2.3. Prompting am Beispiel numerischer Aufgaben

Ein exemplarisches Anwendungsszenario für den Custom-GPT ist die Erstellung von Aufgaben zur Berechnung von Schneelasten auf verschiedenen Dachtypen. Hierbei gibt der Lehrende Fachinhalte wie Berechnungsformeln, zulässige Parameterbereiche und typische Problemstellungen vor. Der Custom-GPT verarbeitet diese Vorgaben und erzeugt daraus vielfältige Aufgabenstellungen mit unterschiedlichen Ausgangswerten, Rechenschritten und Lösungsvorschlägen. Sind die Aufgaben für den Ersteller nicht zufriedenstellend, erfragt der Custom-GPT in einem Dialog mit der Lehrkraft wichtige Änderungen. Alternativ können dem System über sogenannte Few-Shot-Beispiele zusätzliche Beispielaufgaben zur Verfügung gestellt werden, um die Ergebnisstabilität zu erhöhen und die Varianz zu steuern [3].

Durch diese Vorgehensweise können in kürzester Zeit umfangreiche, thematisch abgegrenzte Aufgabenpools erzeugt werden, die schrittweise aufgebaut und adaptiv auf verschiedene Schwierigkeitsniveaus skaliert werden können. Die Aufgaben stehen den Studierenden anschließend in formativen Online-Tests zur Verfügung, die sie jederzeit für individuelle Übungszwecke nutzen können.

Im Folgenden wird die Generierung einer Schneelastaufgabe beispielhaft dargestellt.

#### Prompt 1:

*„Erstelle eine numerische Aufgabe für Studierende des Bauingenieurwesens über die Berechnung von Schneelasten auf einem Flachdach für die Lernplattform OpenOLAT. Verwende als Grundlage die zur Verfügung gestellten Beispiele.“*

Der Custom-GPT erzeugt auf Basis des ersten Prompts eine Aufgabe. Diese Aufgaben können durch weitere Prompts präzisiert und verbessert werden. Im vorliegenden Fall wurde diese zufriedenstellende Aufgabe generiert:

*„Ein Gebäude besitzt ein Flachdach mit Dachneigung  $\leq 5^\circ$ . Die charakteristische Schneelast am Boden beträgt  $s_k = 0,85 \text{ kN/m}^2$ . Berechne die auf das Dach wirkende charakteristische Schneelast in  $\text{kN/m}^2$ . Gib dein Ergebnis als Zahl ohne Einheit ein.“*

#### Prompt 2:

Dem Benutzer steht die Möglichkeit offen, die Anzahl der Aufgaben durch einen weiteren Prompt zu skalieren:

*„Erstelle 10 weitere Aufgaben auf Basis der erstellten Aufgabe.“*

#### Prompt 3:

Die generierten Aufgaben können mithilfe eines abschließenden Prompts in den Importformaten der Lernplattformen oder als PDF-Übungsblatt ausgegeben werden. Das Format des Exports ist abhängig von den jeweils verwendeten Lernplattformen. Angesichts dessen wird der Custom GPT eine Nachfrage über die verwendete Plattform stellen, sollte diese nicht bereits zuvor angegeben sein.

*„Exportiere diese Aufgaben für OpenOLAT.“*

Mit diesem Prompt werden die Fragen in dem entsprechenden Format ausgegeben und können in die Lernplattformen importiert werden.

### **3. Anwendung in der Lehre**

#### **3.1. Anwendungsoptionen**

Die mit dem Custom-GPT erzeugten Fragen können über die integrierten Im-portschnittstellen direkt in gängige Lernplattformen übertragen werden. Dort können sie flexibel als Übungs- oder Testaufgaben genutzt werden. Auch der Einsatz individuell generierter Fragen im Rahmen von Prüfungsleistungen ist problemlos möglich. Dank der automatisierten Erstellung einer großen Aufgabenvielfalt lassen sich zudem personalisierte Tests mit individuellen Aufgaben für jede/n Studierende/n zusammenstellen.

Neben der direkten Einbindung in Lernplattformen (z. B. OpenOLAT oder OPAL) können die generierten Fragen auch in klassischen Übungsblättern verwendet werden. Hierzu bietet das System die Möglichkeit, Aufgaben als PDF auszugeben. Diese umfassen jeweils ein Aufgabenblatt sowie eine separate Lösungsskizze.

#### **3.2. Erfahrungswerte**

Die ersten Erfahrungen aus der Pilotphase zeigen, dass das System sowohl von Lehrenden als auch von Studierenden als leicht zugänglich und didaktisch unterstützend wahrgenommen wird. Für die Akzeptanz seitens der Lehrenden spielen vor allem die einfache Handhabung und die Verlässlichkeit der erzeugten Inhalte eine zentrale Rolle. In der Regel genügt bereits eine kurze Einführung, um einen sicheren Einstieg in die Nutzung zu ermöglichen.

Studierende betonen besonders den Vorteil, jederzeit auf eine breite Auswahl an Übungsaufgaben zurückgreifen zu können. Dies schafft zusätzliche Übungsmöglichkeiten und stärkt das Vertrauen in die eigene Prüfungsvorbereitung. Viele berichten, dass sie sich durch die automatisierten Tests besser vorbereitet fühlen und ein klareres Verständnis der Lerninhalte entwickeln.

Gleichzeitig wird deutlich, dass der Mehrwert des Systems entscheidend von seiner didaktischen Einbindung abhängt. Werden die Aufgaben gezielt auf Lernziele abgestimmt und sinnvoll in die Lehrveranstaltung integriert, entfaltet sich ein deutlich höheres Potenzial, als dies bei isolierten Übungsfragen der Fall ist.

### **4. Grenzen und Gestaltungsbedarfe**

Trotz der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und der positiven Rückmeldungen aus der Pilotphase zeigen sich bei der Anwendung von INGenious Quizzing auch klare Grenzen und Entwicklungsbedarfe.

#### **4.1. Datenschutz und Urheberrechte**

Für den Einsatz gilt: Es dürfen ausschließlich frei verfügbare OER-Materialien oder selbst erstellte Inhalte genutzt werden [4]. Das Einbinden urheberrechtlich geschützter Materialien oder personenbezogener Daten in KI-Systeme kann zu rechtlichen Konsequenzen führen. Vor der Nutzung ist daher zu prüfen, ob alle Inhalte frei von Rechten Dritter sind und den hochschulischen Datenschutzvorgaben entsprechen.

#### **4.2. Qualitätssicherung**

Die Qualität der automatisch erzeugten Inhalte ist nicht immer konsistent. Fehlerhafte Aufgaben oder widersprüchliche Rückmeldungen machen eine sorgfältige Prüfung durch Lehrende unerlässlich. Prompts sollten regelmäßig angepasst und auf fachliche Aktualität überprüft werden. Ein kontinuierlicher Austausch zwischen Lehrenden kann helfen, die Methodik zu optimieren und die Qualität langfristig zu sichern.

## 5. Fazit und Ausblick

Mit INGenious Quizzing wurde ein Ansatz entwickelt, der zeigt, wie Künstliche Intelligenz zur effizienten Erstellung didaktisch fundierter Übungsaufgaben in der Hochschullehre beitragen kann. Die Pilotphase hat verdeutlicht, dass sowohl Lehrende als auch Studierende von der niedrigschwelligen Bedienbarkeit und den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten profitieren. Insbesondere die Möglichkeit, jederzeit auf eine breite Auswahl an Übungsformaten zugreifen zu können, steigert die Motivation und fördert ein strukturierteres Verständnis der Lerninhalte. Gleichzeitig bleibt die Qualitätssicherung der generierten Inhalte eine zentrale Aufgabe, die eine enge Einbindung der Lehrenden erfordert.

Für die Zukunft ist davon auszugehen, dass sich die Leistungsfähigkeit der zugrunde liegenden KI-Modelle stetig weiterentwickelt. Damit wird sich auch die Qualität der automatisch erzeugten Fragen kontinuierlich verbessern, was den didaktischen Nutzen des Systems deutlich steigert.

Langfristig könnte das Projekt zu einem festen Bestandteil digitaler Lernangebote an Hochschulen werden. Durch die Kombination aus guter Anschlussfähigkeit, rechtssicherer Nutzung von OER-Materialien und einfacher Skalierbarkeit kann INGenious Quizzing einen hilfreichen Beitrag zur Weiterentwicklung der Lehre leisten.

## Literaturverzeichnis

- [1] Hochschule Mainz, „Studiengangsberichte Bauingenieurwesen,“ Mainz, 2024.
- [2] J. Albes, T. Bender und F. de Boni, „Befragung von Lehrenden der Hochschule Mainz zur Nutzung und Akzeptanz von Online-Tests,“ Mainz, 2024.
- [3] T. B. Brown, B. Mann, N. Ryder, M. Subbiah, J. Kaplan, P. Dhariwal, A. Neelakantan, P. Shyam, G. Sastry, A. Askell, S. Agarwal, A. Herbert-Voss, G. Krueger, T. Henighan, R. Child, A. Ramesh, D. M. Ziegler, J. Wu, C. Winter, C. Hesse, M. Chen, E. Sigler, M. Litwin, S. Gray, B. Chess, J. Clark, C. Berner, S. McCandlish, A. Radford, I. Sutskever und D. Amodei, „Language Models are Few-Shot Learners,“ 2020.
- [4] UNESCO, „Recommendation on Open Educational Resources (OER),“ 2019.

## **CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale durch Steigerung der Wohnraumeffizienz im Bestand und altersgerechte Wohnkonzepte**

Thanh Vivien Le-Vu, Frank Felix Meckmann  
Hochschule Ruhr West, Mülheim an der Ruhr

*Abstract: Dieses Forschungsprojekt untersucht die CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale, die sich aus einer effizienteren Nutzung bestehenden Wohnraums ergeben, insbesondere im Kontext altersgerechter Wohnkonzepte für Menschen ab 65 Jahren. Vor dem Hintergrund der deutschen Klimaneutralitätsziele bis 2045, des anhaltenden Wohnraummangels und des demografischen Wandels ist die Optimierung des Bestands von besonderer Bedeutung.*

*Im Fokus stehen Einfamilienhäuser älterer Eigentümer\*innen, die aufgrund von Auszug der Kinder oder Tod vom Partner nicht mehr effizient genutzt werden. Oft stellen diese Häuser für die Eigentümer\*innen eine Last dar, da Pflege, Beheizung und Instandhaltung zunehmend schwerfallen. Gleichzeitig bestehen häufig Hemmnisse, energetische Sanierungen oder Modernisierungen umzusetzen, etwa aufgrund von Aufwand, Kosten oder fehlender Motivation. Das Projekt untersucht daher Ansätze, den Wohnraum dieser Zielgruppe bedarfsgerecht zu gestalten – etwa durch Umnutzung, Aufteilung, Aufstockung oder den geordneten, freiwilligen Auszug. Auf diese Weise kann zusätzlicher Wohnraum geschaffen und gleichzeitig energetisch saniert werden. Neubauten zur Lösung des Wohnraummangels verursachen hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen, sodass die Optimierung des Bestands einen zentralen Beitrag zur Vereinbarkeit von Wohnraumsicherung und Klimazielen leistet. Die Analyse konzentriert sich auf das Ruhrgebiet als Modellregion, da hier ein hoher Anteil älterer Haushalte und Bestandsgebäude überdurchschnittliche Potenziale für Energieeinsparung und effiziente Wohnraumnutzung bietet. Ziel der Forschung ist es, das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial quantitativ zu erfassen, Hindernisse bei der Umsetzung zu identifizieren und praxisnahe Handlungsempfehlungen zur Reaktivierung vorhandener Immobilien und zur Steigerung der Sanierungsquote zu entwickeln. Qualitative Umfragen und die kontinuierliche Weiterentwicklung zentraler Forschungsfragen bilden die Grundlage der Methodik.*

*Insgesamt leistet das Forschungsprojekt einen dreifachen Beitrag: Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen, Verbesserung der Lebensqualität älterer Menschen und Entlastung des angespannten Wohnungsmarktes. Durch die Verbindung von Wohnraumeffizienz, energetischer Sanierung und demografiegerechter Wohnraumgestaltung entsteht ein integriertes Konzept, das sowohl die Herausforderungen des Klimaschutzes als auch die des Wohnraummangels adressiert.*

## 1. Einleitung

Deutschland steht vor einer komplexen Herausforderung, die die Bereiche Klimaneutralität, Wohnungsbau und demografischen Wandel miteinander verknüpft. Das ambitionierte Ziel der Klimaneutralität bis 2045 erfordert eine drastische Reduzierung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren, wobei der Gebäudesektor eine Schlüsselrolle spielt. Aktuell verursacht der Betrieb von Gebäuden rund 35 % des Endenergieverbrauchs und knapp 30 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen [1]. Diese Emissionen entstehen jedoch nicht nur im Betrieb, sondern bereits bei der Herstellung von Baustoffen, dem Bau selbst sowie der Instandhaltung und dem späteren Rückbau. Neubau und Emissionsreduktion stehen sich oft widersprüchlich gegenüber, da das Bauen enorme Mengen CO<sub>2</sub> verursacht.

Daher sollte verstärkt der Bestand genutzt werden, da etwa 80 Prozent der Gebäude, die im Jahr 2050 noch stehen werden, bereits heute existieren [2]. Diese Flächen müssen effizienter genutzt werden, um Neubauten und somit zusätzliche Ressourcen und Emissionen zu vermeiden.

Der Fokus dieses Forschungsprojekts liegt auf dem Altbestand, insbesondere auf Einfamilienhäusern (EFH). Dass sich das EFH in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts als Wohnideal etablierte, wird heute zunehmend kritisch begleitet. EFH gelten als flächen- und ressourcenintensiv, wobei die Pro-Kopf-Wohnfläche hier besonders hoch ist. Diese Haustypologie ist oft nicht optimal für die Zeit nach dem Auszug der Kinder durchdacht, da Lage und Zuschnitt selten auf kleine, alternde Haushalte ausgelegt sind. Im Vergleich zu anderen Haustypologien verursachen EFH pro Kopf deutlich mehr Treibhausgase – sowohl durch den höheren Energiebedarf pro Quadratmeter als auch durch den enormen Ressourceneinsatz in der Konstruktion [3]. Um diese Bilanz zu korrigieren und die Klimaziele zu erreichen, ist es unumgänglich, die Sanierungsquote des Altbestands von aktuell etwa 0,7 % auf mindestens 2 % zu verdoppeln [4].

Hier steckt ein enormes Potenzial, den Bestand nicht nur energetisch zukunftsfähig zu machen, sondern ihn auch effizienter zu nutzen. Denn das Problem in Deutschland ist paradox: Neben der hohen Anzahl an Altbauten besteht in Deutschland weiterhin ein großer Wohnraummangel, überwiegend in den Ballungsräumen. Ein Blick auf die Entwicklung seit der Wiedervereinigung verdeutlicht die Situation: Im Jahr 1991 gab es im gesamtdeutschen Bundesgebiet rund 35 Millionen Wohnungen bei etwa 80 Millionen Einwohnern. Bis zum Jahr 2024 stieg die Anzahl der Wohnungen auf etwa 43,8 Millionen [5] bei einer Einwohnerzahl von rund 84,7 Millionen. Zur Verdeutlichung: Die Anzahl der Wohnungen stieg seit 1991 um etwa 25 %, während die Einwohnerzahl nur um circa 6 % anwuchs. Dies bedeutet, dass die Pro-Kopf-Wohnfläche stark angestiegen ist (von 34,9 m<sup>2</sup> im Jahr 1991 auf heute über 49 m<sup>2</sup> [6, 5]), was den hohen Bedarf trotz des Bestandszuwachses erklärt.

Gleichzeitig steckt der Sektor in der Krise. Aktuelle internationale Entwicklungen haben Rückwirkungen auf den Wohnungsbau hinterlassen. Der Neubau ist deutlich zurückgegangen [7], Baugenehmigungen und Fertigstellungen liegen weit hinter den Zielgrößen, und die Lücke zwischen Wohnungsbedarf und -angebot wächst stetig weiter [8].

Parallel dazu führt der demografische Wandel zu einer wachsenden Zahl älterer Menschen, die spezifische Anforderungen an ihren Wohnraum stellen. Der Anteil der Haushalte, in denen die Haupteinkommensperson 65 Jahre oder älter ist, beträgt aktuell etwa 25 % und wird

bis 2035 voraussichtlich auf rund 30 % steigen [9]. Dies erfordert eine Anpassung der Wohnmöglichkeiten für diese Zielgruppe, die zwar autark in den eigenen vier Wänden leben möchte, sich aber zunehmend durch die Wohnsituation belastet fühlt. Dies zeigt sich an ungenutzten Wohnflächen sowie der Überforderung bei der Pflege und dem Betrieb eines zu groß gewordenen Heims.

Die Babyboomer der Jahrgänge 1957 bis 1968, die rund 18 bis 20 % der Bevölkerung ausmachen, werden diesen Trend in den kommenden Jahren massiv verstärken, sobald sie das Ruhestandsalter erreichen.

Diese drei Herausforderungen – Klimaneutralität, Wohnraummangel und demografischer Wandel – erfordern integrierte Lösungsansätze. Diese Forschung beleuchtet, wie die Steigerung der Wohnraumeffizienz im Bestand, insbesondere durch die Förderung altersgerechter Wohnkonzepte, einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten kann. Gleichzeitig kann dies die Lebensqualität älterer Menschen verbessern und den Wohnraummangel entlasten. Die folgenden Kapitel stellen die Hintergründe, die Projektidee und die Forschungsziele im Detail dar.

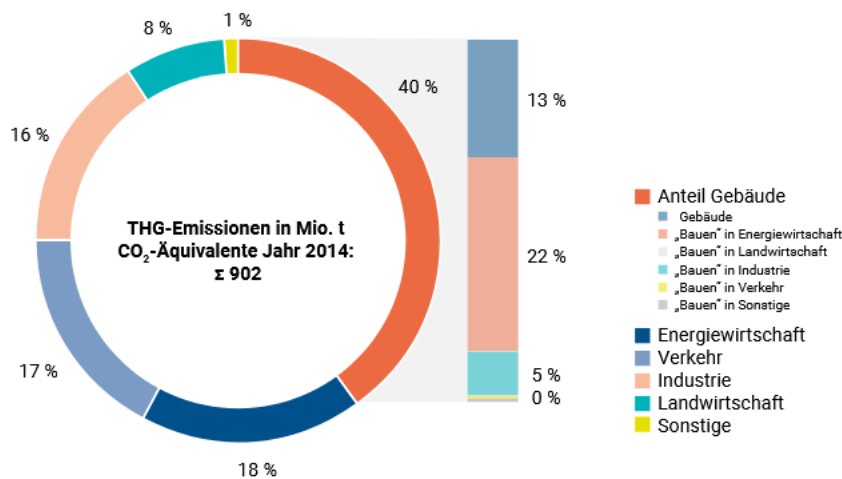
## **2. Hintergründe und Entstehung des Themas**

Die Projektidee resultiert aus der dringenden Notwendigkeit, multiple gesellschaftliche Herausforderungen in Deutschland synergetisch anzugehen. Im Kern stehen dabei die Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland bis 2045, die Bewältigung des akuten Wohnraummangels und die Anpassung an die demografische Entwicklung, insbesondere die steigende Zahl älterer Menschen. Diese Herausforderungen sind nicht isoliert zu betrachten, sondern bedingen und beeinflussen sich gegenseitig, was integrierte Lösungsansätze erfordert.

### **2.1. Klimaneutralität bis 2045 und der Gebäudesektor**

Deutschland hat sich das ambitionierte Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu sein. Dies erfordert eine signifikante Reduzierung der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren. Der Gebäudesektor spielt eine zentrale Rolle, da sowohl die direkten Emissionen aus Heizung, Warmwasser und Stromverbrauch als auch die indirekten Emissionen, die bei der Bereitstellung dieser Energie entstehen, insbesondere im Betrieb eines Gebäudes, eine hohe Relevanz für den Gesamtenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Landes haben [1]. Dies unterstreicht die Bedeutung gezielter Maßnahmen zur Energieeffizienz, Gebäudesanierung und Wärmewende für die Erreichung nationaler Klimaziele.

Wie die entsprechende Abbildung verdeutlicht, lassen sich rund 40 % der Treibhausgasemissionen direkt oder indirekt auf Gebäude zurückführen. Diese Zahl umfasst neben dem reinen Betrieb auch den Bereich „Bauen“, dessen Auswirkungen sich über die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr und Landwirtschaft verteilen. Dabei ist die Klimabelastung nicht allein auf die Nutzungsphase beschränkt: Ein wesentlicher Teil entfällt auf die sogenannte graue Energie, die bei der Gewinnung, Herstellung und dem Transport von Baustoffen anfällt. Da der Betrieb über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg den zeitlich umfangreichsten Faktor darstellt, bietet gerade die energetische Optimierung des Bestands ein enormes Potenzial, um die Emissionen massiv zu senken und die nationalen Klimaziele zu erreichen.

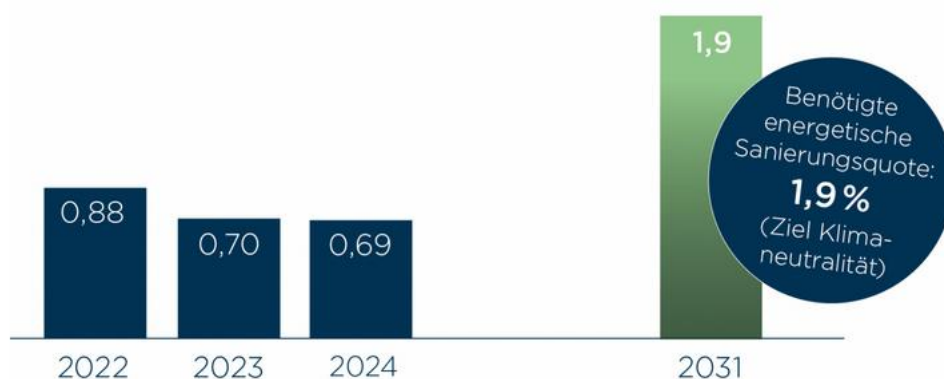


**Abb. 1: Treibhausgasemissionen für alle Sektoren**

Quelle: Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2021) „DENA-GEBÄUDEREPORT 2022. Zahlen, Daten, Fakten.“

Der Kern dieser Forschungsarbeit liegt in der Erkenntnis, dass das bauliche Grundgerüst Deutschlands weitgehend feststeht. Da rund 80 % des Gebäudebestands vom Jahr 2050 bereits heute existieren [2], ist ein verantwortungsbewusstes Haushalten mit diesen vorhandenen Strukturen unumgänglich, um die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Neubausektors zu reduzieren. Neubauten verursachen durch die Rohstoffgewinnung, die energieintensive Herstellung von Baumaterialien und den eigentlichen Konstruktionsprozess enorme Mengen an Treibhausgasen, die durch eine konsequente Bestandsnutzung vermieden werden können.

Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf der Aktivierung und Optimierung des bestehenden Immobilienportfolios. Bisher ist dieser Bestand jedoch noch nicht ausreichend energetisch ertüchtigt und verursacht in der Betriebsphase weiterhin hohe Emissionen. Dennoch belegen Lebenszyklusanalysen, dass eine Sanierung in der Gesamtbilanz deutlich weniger CO<sub>2</sub> verursacht als ein vergleichbarer Ersatzneubau. Um die Klimaziele zu erreichen, fordern Experten die aktuelle Sanierungsrate von aktuell etwa 0,7 % mindestens eine Rate von 2 % [4].



**Abb. 2: Benötigte energetische Sanierungsquote**

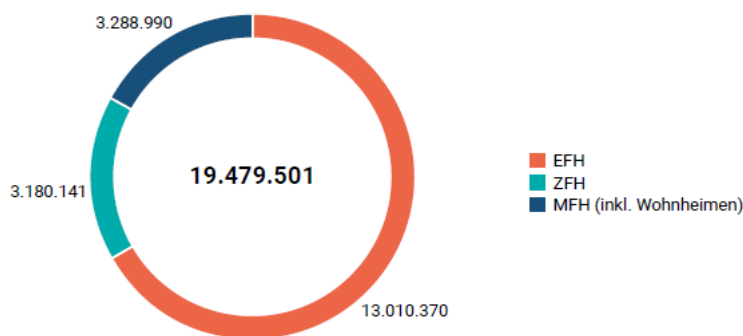
Quelle: <https://buveg.de/sanierungsquote/>

Der Gebäudesektor erreicht seit Jahren nicht die CO<sub>2</sub>-Einsparziele der Regierung und bleibt mit einem Anteil von 30 % an den Gesamtemissionen eines der größten Sorgenkinder der

deutschen Klimapolitik. Um die angestrebte Klimaneutralität bis 2045 dennoch zu erreichen, beziffert die dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“ (2022) den notwendigen Handlungsbedarf deutlich: Die jährliche Sanierungsquote müsste auf 1,7 bis 1,9 % steigen.

Die Steigerung der Sanierungstätigkeiten hat viele positive Auswirkungen für Immobilieneigentümer\*innen, Nutzer\*innen und die deutsche Wirtschaft. Durch die vielfältige Wertschöpfung infolge energetischer Sanierungstätigkeiten entstehen beträchtliche Auswirkungen auf die Binnenwirtschaft und den Arbeitsmarkt. Immobilieneigentümer\*innen profitieren insbesondere davon, dass der Wert einer Immobilie mit verbesserter Gebäudehülle und damit Energieeffizienz gesteigert wird. Nutzer\*innen werden unabhängiger von schwankenden Energiepreisen, müssen geringere Heizkosten aufbringen und der Wohnkomfort erhöht sich.

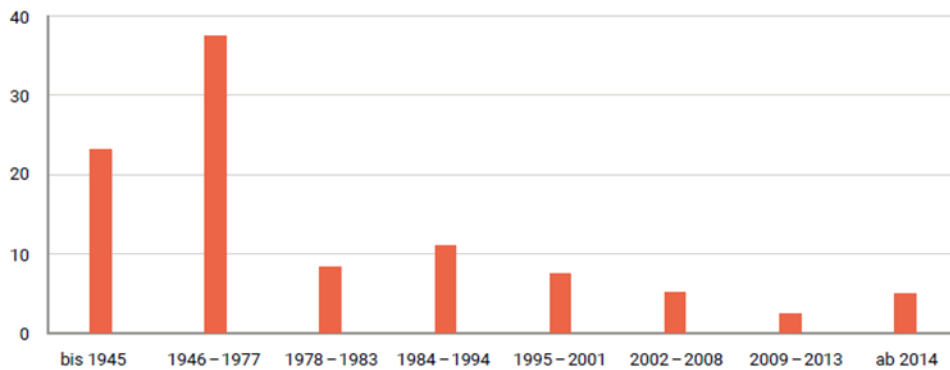
Der enorme Nachholbedarf wird besonders beim Blick auf die energetische Qualität des Bestands deutlich. Zwei Drittel aller Wohngebäude in Deutschland sind vor 1980 erbaut und von diesem Altbestand sind zwei Drittel den schlechtesten Effizienzklassen F bis H zuzuordnen [10] und weisen einen Endenergieverbrauch von über 160 kWh/m<sup>2</sup> pro Jahr auf. Obwohl sie nur einen Teil des Bestands ausmachen, sind sie für die Hälfte des gesamten Energieverbrauchs im Gebäudesektor verantwortlich. Diese Konzentration verdeutlicht, dass eine gezielte Sanierung gerade dieser ineffizienten Gebäude einen massiven Hebel für den Klimaschutz darstellt.



**Abb. 3: Wohngebäudebestand in Deutschland 2022**

Quelle: Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand.

Der deutsche Wohngebäudebestand umfasste im Jahr 2022 rund 19,5 Millionen Gebäude, was einem Zuwachs von etwa 100.000 Einheiten (0,5 %) gegenüber dem Vorjahr entspricht. Den mengenmäßig größten Anteil nehmen dabei mit rund 13 Millionen Objekten die EFH ein, gefolgt von 3,2 Millionen Zweifamilienhäusern (ZFH) und 3,3 Millionen Mehrfamilienhäusern (MFH). Zwar verzeichneten die MFH mit einem Plus von 0,6 % (ca. 18.400 Gebäude) den höchsten prozentualen Zuwachs, doch der Großteil der baulichen Tätigkeit entfiel mit 85.000 neuen Gebäuden (0,5 %) weiterhin auf den Bereich der EFH und ZFH [11].



**Abb. 4: Wohngebäudebestand nach Baualtersklassen**

Quelle: Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand.

Diese statistischen Daten verdeutlichen den energetischen Zustand der deutschen Wohnlandschaft: Rund ein Viertel (24 %) des Bestands wurde bereits vor 1946 errichtet, während weitere 36 % aus der Zeit zwischen 1946 und 1978 stammen. Damit wurden insgesamt etwa 60 % aller Wohngebäude vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung im Jahr 1978 gebaut. Im Gegensatz dazu wurden seit der Einführung der Energieeinsparverordnung (EnEV) im Jahr 2014 lediglich rund eine Million Wohngebäude fertiggestellt, was nur etwa 5 % des aktuellen Gesamtbestands entspricht.

Diese Verteilung unterstreicht das enorme Potenzial, das im Altbestand schlummert. Da der Großteil der Gebäude zu einer Zeit entstand, in der energetische Standards noch keine gesetzliche Rolle spielten, ist die Relevanz einer gezielten Sanierungspolitik für das Erreichen der Klimaziele offensichtlich.

Angesichts dieser Dominanz im Bestand fokussiert sich die vorliegende Arbeit gezielt auf EFH, die von älteren Eigentümer\*innen bewohnt werden. Diese Immobilien wurden zumeist vor mehreren Jahrzehnten erworben, wobei umfassende Sanierungsmaßnahmen oft ebenso lange zurückliegen. In vielen Fällen wurden notwendige energetische Ertüchtigungen aus unterschiedlichen Gründen aufgeschoben oder gar nicht erst eingeleitet. Daraus resultiert bei dieser spezifischen Haustypologie ein erhebliches Potenzial: Eine gezielte Aktivierung dieser Eigentümergruppe könnte die bundesweite Sanierungsquote massiv steigern und einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten.

## 2.2. Wohnraummangel und demografischer Wandel

Parallel zur ökologischen Herausforderung steht Deutschland vor einer akuten Wohnungsnot, die sich in einem drastischen Mangel an bezahlbarem Wohnraum und stetig steigenden Mieten äußert. Besonders in den Ballungsräumen ist die Situation prekär: Laut der aktuellen Pestel-Studie besteht deutschlandweit mittlerweile ein Wohnraummangel von 1,4 Mio. Wohnungen [12]. Dieser Mangel wird durch eine Neubautätigkeit verschärft, die weit hinter der Nachfrage zurückbleibt [13]. Während die alte Bundesregierung das Ziel von jährlich 400.000 neuen Wohnungen ausgegeben hat, wurden in den vergangenen Jahren real nur etwa 270.000 bis 295.000 Einheiten fertiggestellt – Tendenz sogar sinkend. Verstärkt wird diese Krise durch die fortschreitende Urbanisierung infolge mangelnder Infrastruktur im ländlichen Raum sowie durch komplexe Planungsprozesse und strikte Bauvorschriften, die eine schnelle Reaktion auf den Bedarf erschweren.

Ein wesentlicher Teil der Problematik liegt jedoch nicht allein im fehlenden Neubau, sondern in einer Fehlverteilung des bestehenden Wohnraums. Während junge Familien nach Platz suchen, bewohnen viele ältere Menschen ihre zur Zeit der Familiengründung errichteten EFH auch dann noch weiter, wenn sich die Haushaltsgröße durch den Auszug der Kinder oder den Verlust des Partners reduziert hat. In der Forschung wird dieser Zustand als „Empty-Nest“-Syndrom bezeichnet [14]. Diese Häuser sind häufig „unterbelegt“: Eine große Wohnfläche steht nur sehr wenigen Nutzern zur Verfügung. Aus energetischer und ressourcentechnischer Sicht ist diese Form der Nutzung ineffizient, zumal der Betrieb und die Pflege des zu groß gewordenen Heims für die Eigentümer\*innen zunehmend zur physischen und finanziellen Belastung werden. Ungenutzte Räume verweisen, während an anderer Stelle neue Flächen versiegelt werden müssen [15]. Wenn Kommunen hierauf nur mit neuen Baugebieten reagieren, setzt sich ein ökologisch bedenklicher Kreislauf fort, der die nächste Generation von unterbelegten Häusern bereits vorprogrammiert.

Ein wesentlicher Faktor für den aktuellen Wohnraumangel ist nicht nur das Fehlen von Gebäuden, sondern die ungleiche Verteilung der vorhandenen Flächen über die verschiedenen Lebensphasen hinweg. Während die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf in Deutschland insgesamt bei etwa 47,7 m<sup>2</sup> liegt [6], zeigen sich bei einer differenzierten Betrachtung nach Haushaltskonstellationen enorme Unterschiede.

- Seniorenhaushalte (65+): In dieser Gruppe liegt die Pro-Kopf-Wohnfläche oft weit über dem Durchschnitt. Besonders in Eigentümerhaushalten stehen den älteren Bewohnern durchschnittlich 78,1 m<sup>2</sup> pro Person zur Verfügung [16]. Da die Kinder längst ausgezogen sind, werden viele Räume nicht mehr aktiv genutzt, müssen aber dennoch beheizt und instand gehalten werden.
- Junge Familien: Demgegenüber stehen einer mindestens 4-köpfigen Familien in Ballungsräumen häufig nur 28 bis 32 m<sup>2</sup> pro Kopf zur Verfügung [17]. Hier herrscht ein akuter Mangel an bezahlbaren Vier- oder Fünzimmerwohnungen, während gleichzeitig im Bestand der EFH große Flächenreserven ungenutzt bleiben.

Aufgrund der jahrzehntelangen Nutzung ihrer Immobilien sehen viele Eigentümer\*innen im Alter oft keine Notwendigkeit mehr, größere Investitionen in eine energetische Sanierung zu tätigen. Da die gewohnten Abläufe und die vertraute Umgebung im Vordergrund stehen, bleiben diese EFH häufig in einem energieineffizienten Zustand.

Hier bietet das Aufzeigen alternativer Wohnoptionen für die späte Lebensphase einen entscheidenden Hebel: Durch Konzepte wie die Umnutzung, Vermietung oder die bauliche Umgestaltung des Hauses entstehen neue Impulse für notwendige Modernisierungen. Wird beispielsweise eine Einliegerwohnung für die Vermietung abgetrennt oder das Haus für eine neue Lebenssituation umgestaltet, ist dies meist der Auslöser, die Immobilie im selben Zuge energetisch zu sanieren und zu renovieren. Selbst im Falle eines freiwilligen Auszugs und einer anschließenden Veräußerung besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die neuen Besitzer das Objekt umfassend modernisieren. Somit dient die Anpassung der Wohnsituation an die Bedürfnisse im Alter nicht nur der Lebensqualität, sondern fungiert gleichzeitig als Katalysator, um den ineffizienten Altbestand energetisch zukunftsfähig zu machen.

Das Forschungsprojekt berücksichtigt dabei explizit sozioökonomische und psychologische Faktoren, welche die Umzugsbereitschaft oder die Akzeptanz neuer Wohnformen beeinflussen. Durch eine sensible und partizipative Herangehensweise werden die Bedürfnisse der

älteren Generation in den Mittelpunkt gestellt. Dabei gilt es, Barrieren wie ein mangelndes Bewusstsein für alternative Wohnkonzepte abzubauen und aufzuzeigen, wie bedarfsgerechter Wohnraum die Lebensqualität im Alter nachhaltig verbessern kann, während gleichzeitig ein wertvoller Beitrag zur Entlastung des Wohnungsmarktes und zum Klimaschutz geleistet wird.

### 3. Potenziale der Wohnraumeffizienz und altersgerechte Konzepte

Die Projektidee setzt genau an der Schnittstelle dieser Herausforderungen an: die Optimierung der Wohnraumeffizienz im Bestand, insbesondere durch die Förderung altersgerechter Wohnkonzepte.

Das Ruhrgebiet dient hierbei als Modellregion, da es als größter Ballungsraum Deutschlands einen hohen Anteil an EFH (über 50 % [18]) mit älterer Bausubstanz [19] und seniorengeführten Haushalten (26% Anteil [20]) aufweist. Dies bietet überdurchschnittliche Potenziale zur Emissionsreduzierung durch Sanierung und zur Mobilisierung von Wohnraum. Durch die Verkleinerung, Umnutzung und Nachverdichtung bestehender Wohnraum kann nicht nur der Flächenverbrauch reduziert, sondern auch die Lebensqualität älterer Menschen verbessert werden.

Der Neubau von EFH steht zunehmend in der Kritik. Er verbraucht viel Fläche, verursacht hohe Erschließungskosten und lässt sich nur schwer mit nationalen Klimaschutzzielen vereinbaren. Dennoch zieht es viele Menschen aus den angespannten Wohnungsmärkten der Großstädte ins Umland. Um diesen Widerspruch zu lösen, rückt die Bestandsentwicklung in den Fokus.

Um diese Bestände effizienter zu nutzen, werden Modelle zur Verdichtung und zum altersgerechten Umbau entwickelt. Das Ziel ist eine bedarfsorientierte Wohnraumnutzung, die durch folgende Maßnahmen unterstützt wird:

- Beratung und Begleitung: Eigentümer\*innen und Marktakteure werden direkt bei der Umsetzung von Umbau- oder Nachnutzungskonzepten unterstützt.
- Partizipation und Kommunikation: Durch Workshops und zielgruppenspezifische Formate werden Betroffene aktiv in den Prozess eingebunden.
- Vernetzung und Transfer: Der Aufbau projektbezogener Netzwerke sichert den Austausch zwischen Fachleuten und Bewohner\*innen. Zudem wird geprüft, ob erfolgreiche Instrumente auf andere Quartiere übertragen werden können.

Durch diesen partizipativen Ansatz werden Eigentümer\*innen aktiv in die Gestaltung ihrer Möglichkeiten eingebunden, sodass ihre persönlichen Bedürfnisse direkt in die Planung einfließen. Da jede Entscheidung zur Veränderung der Wohnsituation freiwillig und aus eigenem Antrieb getroffen wird, steigt die Akzeptanz für die neuen Konzepte spürbar.

Wenn es gelingt, die Zielgruppe der älteren Eigentümer\*innen durch attraktive Konzepte – wie die Umwandlung eines Einfamilienhauses in ein Zweifamilienhaus – zu unterstützen, ergeben sich Synergieeffekte für alle Beteiligten:

1. Entlastung des Marktes: Durch die Unterteilung oder den Auszug aus zu großen Objekten wird dringend benötigter Wohnraum für Familien frei, ohne dass ein einziger Quadratmeter neuer Boden versiegelt werden muss.

2. Ressourceneffizienz: Die CO<sub>2</sub>-Bilanz pro Kopf verbessert sich im sanierten und nun voll belegten Haus massiv. Die „graue Energie“ des Bestands wird optimal genutzt.
3. Soziale Komponente: Die älteren Eigentümer erhalten die Möglichkeit, in ihrem gewohnten Umfeld zu bleiben, reduzieren aber ihren Pflege- und Kostenaufwand für das Gebäude und gewinnen gegebenenfalls soziale Nähe durch neue Mitbewohner.

### **3.1. Quantifizierung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzials durch Wohnraumeffizienz**

Ein primäres Ziel ist die detaillierte Quantifizierung der potenziellen CO<sub>2</sub>-Einsparungen, die durch eine optimierte Wohnraumnutzung und energetische Sanierung im Bestand erzielt werden können.

- Analyse des Sanierungsbedarfs: Eine detaillierte Analyse des energetischen Sanierungsbedarfs im Bestandsgebäude, insbesondere in seniorengeführten Haushalten, wird durchgeführt. Hierbei werden verschiedene Sanierungsmaßnahmen (z.B. Dämmung, Fensteraustausch, Heizungserneuerung) und deren spezifische CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenziale bewertet.
- Berücksichtigung direkter und indirekter Emissionen: Neben den direkten Emissionen aus dem Gebäudebetrieb werden auch indirekte Emissionen, die durch die Herstellung von Baumaterialien oder die Bereitstellung von Energie entstehen, in die Bilanzierung einbezogen, um ein ganzheitliches Bild der Umweltauswirkungen zu erhalten.
- Unterschiedliche Szenarien: Es werden unterschiedliche Szenarien der Wohnraumnutzung modelliert, wie z.B. die Umnutzung von leerstehenden Räumen oder die Nachverdichtung innerhalb bestehender Gebäude zur Vermietung neugeschaffener Wohnflächen, die Verkleinerung von Wohnflächen durch Auszug älterer Bewohner\*innen in kleinere, altersgerechte Wohnungen. Für jedes Szenario wird der Einfluss auf den Energieverbrauch und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen kalkuliert.

Die Ergebnisse dieser Quantifizierung sollen nicht nur das theoretische Potenzial aufzeigen, sondern auch als Grundlage für die Entwicklung von Förderprogrammen und politischen Maßnahmen dienen, die auf eine maximale CO<sub>2</sub>-Reduktion abzielen.

### **3.2. Identifikation und Analyse von Hindernissen und Treibern**

Ein weiteres zentrales Forschungsziel ist die umfassende Identifikation und Analyse der Hindernisse und Treiber, die die Umsetzung von Wohnraumeffizienzmaßnahmen und altersgerechten Wohnkonzepten beeinflussen. Dies beinhaltet:

1. Sozioökonomische Faktoren: Untersuchung des Einflusses von Einkommen, Vermögen, Bildungsstand und sozialem Umfeld auf die Bereitschaft zur Wohnraumoptimierung oder zum Umzug in altersgerechte Wohnformen. Hierbei werden auch die finanziellen Belastungen durch Sanierungskosten oder Mietanpassungen beleuchtet.
2. Psychologische und emotionale Faktoren: Analyse der psychologischen Barrieren, wie z.B. die emotionale Bindung an das bestehende Zuhause, die Angst vor Veränderungen, der Verlust des sozialen Umfelds oder die mangelnde Kenntnis über

alternative Wohnmöglichkeiten. Auch die Rolle von Gewohnheiten und Routinen wird hierbei untersucht.

3. Strukturelle und institutionelle Hindernisse: Identifikation von Hemmnissen auf politischer, rechtlicher und administrativer Ebene, wie z.B. komplexe Förderrichtlinien, bürokratische Hürden bei Bauanträgen oder fehlende Beratungsangebote. Auch die Rolle von Akteuren wie Wohnungswirtschaft, Kommunen und sozialen Diensten wird analysiert.
4. Treibende Kräfte und Best Practices: Neben den Hindernissen werden auch die treibenden Kräfte und erfolgreiche Beispiele (Best Practices) identifiziert, die die Umsetzung von Wohnraumeffizienz und altersgerechten Wohnkonzepten fördern. Dies können innovative Wohnmodelle, erfolgreiche Beratungsansätze oder effektive Förderprogramme sein.

Die Erkenntnisse aus dieser Analyse sind entscheidend, um gezielte Strategien zur Überwindung von Barrieren und zur Förderung positiver Entwicklungen zu entwickeln.

#### 4. Entwicklung praxisnaher Handlungsempfehlungen und Implementierungsstrategien

Aufbauend auf den quantifizierten Potenzialen und der Analyse der Hindernisse und Treiber ist das dritte Forschungsziel die Entwicklung von praxisnahen Handlungsempfehlungen und Implementierungsstrategien. Diese sollen konkrete Lösungsansätze für verschiedene Akteure bieten:

**Für die Politik:** Empfehlungen für die Gestaltung von Förderprogrammen, rechtlichen Rahmenbedingungen und politischen Anreizen, die die energetische Sanierung und die Entwicklung altersgerechter Wohnkonzepte fördern. Dies könnte die Vereinfachung von Antragsverfahren, die Einführung neuer Förderinstrumente oder die Anpassung von Bauordnungen umfassen.

**Für die Wohnungswirtschaft:** Empfehlungen für die Entwicklung und Umsetzung von Geschäftsmodellen, die die Wohnraumeffizienz steigern und altersgerechte Wohnformen anbieten. Dies könnte die Entwicklung von Mietmodellen für kleinere Wohnungen, die Sanierung von Bestandsgebäuden oder die Schaffung von Beratungsangeboten für die Zielgruppe umfassen.

**Für Kommunen und soziale Dienste:** Empfehlungen für die Entwicklung von quartiersbezogenen Konzepten, die die soziale Teilhabe älterer Menschen fördern und Beratungsangebote für Wohnraumanpassungen oder Umzüge bereitstellen. Dies könnte die Einrichtung von Beratungsstellen, die Förderung von Mehrgenerationenwohnen oder die Schaffung von Netzwerken zur Unterstützung älterer Menschen umfassen.

**Für die Zielgruppe 65+:** Empfehlungen für ältere Menschen selbst, wie sie ihre Wohnsituation optimieren können, welche Unterstützungsangebote es gibt und welche Vorteile eine Veränderung der Wohnsituation mit sich bringen kann. Dies könnte die Bereitstellung von Informationsmaterialien, die Organisation von Informationsveranstaltungen oder die Vermittlung von Beratungsgesprächen umfassen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, „Energiesparende Gebäude“, 2024, verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebaeude#gebaeude-wichtig-fur-den-klimaschutz>. Zugriff am 05.01.2026
- [2] Deutsche Umwelthilfe e.V., Faktencheck Europäische Gebäuderichtlinie (EPBD) & Mindesteffizienzstandards für Bestandsgebäude (MEPS), 2023
- [3] Zimmermann, P.; Brischke, L.-A.; Späte, E.; Contreras y Duran, L.-A. & Paar, A. (2025): Einfamilienhaus: Quo vadis? Kommunale Perspektiven auf die Transformation des EFH-Bestandes. vhw-Schriftenreihe Nr. 52. Berlin.
- [4] Popović, Tobias; Reichhard-Chahine, Jessica, Umweltbundesamt „Finanzierung von energetischen Gebäudesanierungen“, 2024
- [5] Statistisches Bundesamt, „43,8 Millionen Wohnungen in Deutschland zum Jahresende 2024“, verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/09/PD25\\_336\\_31231.html#:~:text=43%2C8%20Millionen%20Wohnungen%20in%20Deutschland%20zum%20Jahresende%202024%20%2D%20Statistisches%20Bundesamt](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/09/PD25_336_31231.html#:~:text=43%2C8%20Millionen%20Wohnungen%20in%20Deutschland%20zum%20Jahresende%202024%20%2D%20Statistisches%20Bundesamt). Zugriff am 05.01.2026
- [6] Manager Magazin, „Pro-Kopf-Wohnfläche in Deutschland steigt deutlich“, 2023, verfügbar unter: <https://www.manager-magazin.de/finanzen/immobilien/wohnflaeche-pro-kopf-in-deutschland-steigt-a-34f67fb2-3160-49e6-ade0-bda2ee85f537>. Zugriff am 05.01.2026
- [7] Statistisches Bundesamt, „14,4 % weniger fertiggestellte Wohnungen im Jahr 2024“, verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/05/PD25\\_183\\_31121.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/05/PD25_183_31121.html). Zugriff am 05.01.2026
- [8] Whittle, Helen, „German housing crisis: government plans construction boost“, 2025, verfügbar unter: <https://p.dw.com/p/4xm5M>. Zugriff am 05.01.2026
- [9] Statistisches Bundesamt, „Zahl der älteren Menschen wird zunehmen“, 2026, verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/Aeltere-Menschen/anstieg-aeltere.html>. Zugriff am 05.01.2026
- [10] Rommelmann Immobilien, „EU-Sanierungspflicht: das müssen Immobilienbesitzer wissen,,,“, verfügbar unter: <https://rommelmann.immobilien/eu-sanierungspflicht/>. Zugriff am 05.01.2026
- [11] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand.
- [12] Tagesschau, „In Deutschland fehlen 1,4 Millionen Wohnungen“, 2026, verfügbar unter: <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/verbraucher/sozialer-wohnungsbau-126.html>. Zugriff am 16.01.2026
- [13] Süddeutsche Zeitung, „Zahl der Neubauwohnungen 2024 gesunken“, 2025, verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/neubauwohnungen-deutschland-immobilien-li.3257983>. Zugriff am 05.01.2026
- [14] Brischke, L.-A., „Empty nest“. GEB Schwerpunkt Quartier, 10/2018
- [15] Fuhrhop, D., „Der unsichtbare Wohnraum, Wohnsuffizienz als Antwort auf Wohnraum-mangel, Klimakrise und Einsamkeit“, 2023
- [16] Statistisches Bundesamt, „Haushalte der Altersgruppe 65+ haben pro Kopf den meisten Wohnraum zur Verfügung“, 2023, verfügbar unter:

[https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23\\_N035\\_12.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_N035_12.html). Zugriff am 04.01.2026

[17] Statistisches Bundesamt, „Wohnsituation privater Haushalte 2022 in Deutschland“, 2026, verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/ergebnisse\\_zusatzprogramm.html#641886](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/ergebnisse_zusatzprogramm.html#641886). Zugriff am 04.01.2026

[18] IT.NRW, Zensus 2022, verfügbar unter: <https://www.giscloud.nrw.de/arcgis/apps/storymaps/stories/9170a2643cdc4b729e1af0c0701a60d7>. Zugriff am 03.01.2026

# Verbundverhalten nichtmetallischer Bewehrung

Kay Lengert

Hochschule für angewandte Wissenschaften Kiel

## ABSTRACT

*Die Kenntnis des Verbundverhaltens zwischen Bewehrung und Beton ist unerlässlich bei der Bestimmung der Verankerungslänge und der Rissbreitenberechnung. Da die Verbundeigenschaften von Betonstahl und nichtmetallischer Bewehrung abweichen, müssen entsprechende Ansätze auf ihre Anwendbarkeit überprüft werden. Anhand von Pull-Out-Versuchen werden Verbundspannungs-Schlupf-Modelle für verschiedene Bewehrungsstäbe kalibriert. Die verschiedenen Versagensarten des Verbundes werden anhand aufgesägter Probekörper beschrieben. Im Rahmen einer Parameterstudie zur Berechnung der Rissbreite und der Verankerungslänge konnten die Einflüsse der Verbundfestigkeit, der Verbundsteifigkeit und des E-Moduls erfasst werden. Eine Datenbank mit Verbundversuchen aus der Literatur wurde erstellt, um die Abhängigkeit bestimmter Parameter auf das Verbundverhalten zu untersuchen. Ferner soll die Datenbank dazu dienen, eigene Berechnungen und Versuche zu verifizieren und allgemeingültige Aussagen zu treffen. Um einen vertieften Einblick in den Kraftfluss bei der Verbundkraftübertragung zu bekommen, wird ein nicht-lineares Finite Elemente Modell erstellt. Abschließend wird die praxisgerechte Anwendbarkeit am Beispiel einer Uferwand mit BFVK-Bewehrung bewiesen.*

## 1. Einleitung

Die Kraftübertragung zwischen Bewehrung und Beton durch Verbund stellt die Grundlage für die Tragfähigkeit bewehrter Betonbauteile dar. Bei Stahlbetonbauteilen ist das Funktionieren des Verbundes hauptsächlich über die Einhaltung von Konstruktionsregeln sichergestellt. Bei Betonbauteilen mit FVK-Bewehrung können diese Konstruktionsregeln nicht unangepasst übernommen werden, da Bewehrung aus FVK andere Material- und Verbundeigenschaften aufweist. Daher ist eine gezielte Untersuchung des Verbundverhaltens notwendig. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen fließen dann beispielsweise in Ansätze zur Bestimmung der Betondeckung, der Verankerungs- und Übergreifungslänge sowie zur Berechnung von Durchbiegungen und Rissbreiten ein.

## 2. Grundlagen

### 2.1. Allgemein

Unter dem Verbund versteht man die Kraftübertragung zwischen Stahl und Beton, welche eine wesentliche Voraussetzung für das Funktionieren von Stahlbetonkonstruktionen ist. Man unterscheidet die Verbundmechanismen Haftverbund, Scherverbund durch mechanische Verzahnung

und Reibverbund. Die wesentlichen Einflussparameter auf das Verbundverhalten sind die bezogene Rippenfläche, die Betonfestigkeit, der äußere Querdruck, die Betonzusammensetzung, die Betondeckung, der Stabdurchmesser und die Lage des Stabes beim Betonieren.

## 2.2. Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

Mit einer Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung lässt sich das Verbundverhalten über das Verhältnis von Ausziehungskraft, welche die Verbundspannungen  $\tau(s)$  hervorruft, und der Relativverschiebung zwischen Bewehrung und Beton, dem Schlupf  $s$ , beschreiben. Treten bei hohen Verbundspannungen geringe Relativverschiebungen auf, spricht man von einem guten Verbundverhalten [1].

Im Laufe der Zeit wurden für Bewehrung aus FVK verschiedene Formulierungen für die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung entwickelt [2], [3]. Durch den Autor wird das mBPE-Modell, welches u. a. im ModelCode 2010 [4] beschrieben wird, aufgrund seiner einfachen mechanischen Interpretation bevorzugt (Gl. 1). Der ansteigende Ast der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung wird hierin als exponentielle Funktion in Abhängigkeit der maximalen Verbundspannung  $\tau_{bm}$  und des Schlupfes  $s_m$ , der bei maximaler Verbundspannung erreicht wird, beschrieben. Nach überschreiten der maximalen Verbundspannung werden die Verbundkräfte durch Reibung übertragen. Dies wird mit dem linear abfallenden Ast beschrieben (siehe Abbildung 1).

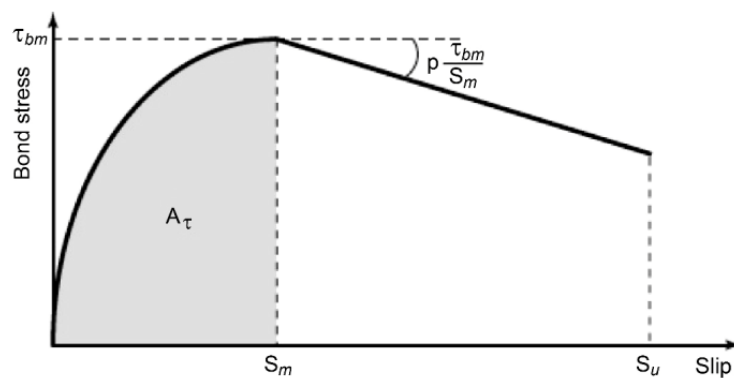


Abbildung 1: Modell der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung nach [4]

$$\tau_b(s) = \begin{cases} \tau_{bm} \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha & \text{für } 0 \leq s \leq s_m \\ \tau_{bm} - \tau_{bm} \cdot p \cdot \frac{s - s_m}{s_m} & \text{für } s_m < s \leq s_u \end{cases} \quad (1)$$

Hierin sind:  $\tau_{bm}$  maximale Verbundspannung  
 $s_m$  Schlupf bei maximaler Verbundspannung  
 $\alpha$  Exponent für den ansteigenden Ast  
 $p$  Faktor für den abfallenden Ast

## 2.3. Zugring-Modell

Das Zugring-Modell, welches erstmals von Tepfers [5] eingeführt wurde, dient der Beschreibung des Spaltbruchwiderstandes der Betondeckung (Abbildung 2). Hierbei werden drei mögliche Spannungszustände unterschieden, für die Tepfers Gleichungen zur Berechnung des aufnehmbaren Innendruckes angibt. Die Festigkeit hängt hierbei direkt von der Betonzugfestigkeit ab. Man unterscheidet das elastische, plastische, elastisch gerissene sowie kohäsiv gerissene Zugringmodell. Nach Ritter [6] liefert das plastische Zug-ringmodell die beste Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen. Auf Grundlage des plastischen Zugringmodells und der Differentialgleichung des

verschieblichen Verbundes entwickelte Caspari [7] einen Ansatz zur Berechnung der Verankerungslänge und der erforderlichen Betondeckung (Gleichung 2 (ohne Berücksichtigung des Ausbruchwinkels)).

$$c = (p_i \cdot f_{ct}) \cdot d / (2 \cdot f_{ct}) \geq 0 \quad (2)$$

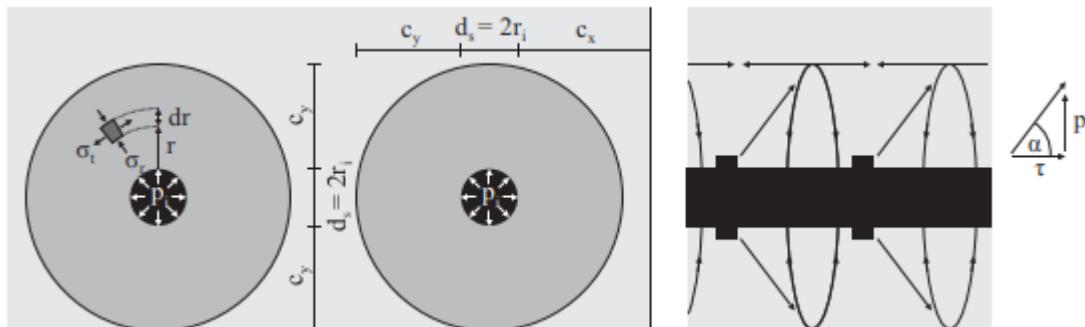


Abbildung 2: Zugringmodell nach Teffers [5] aus [6]

## 2.4. Versagensarten

Hinsichtlich des Verbundversagens sind für Stahlbeton das Versagen durch Spalten der Betondeckung und das Versagen durch Ausziehen, wobei die Betonkonsolen vor den Rippen des Stabes abscheren, typisch. Bei mit FVK bewehrten Bauteilen müssen diese Versagensarten erweitert werden [8], [9]:

- Ausziehen mit Abscheren der Betonkonsole
- Ausziehen mit Abscheren der Profilierung des FVK-Stabes
- Durchzwängen des FVK-Stabkerns
- Kombiniertes Versagen
- Spaltbruch

## 3. Experimentelle Untersuchungen

Zur Bestimmung von experimentellen Verbundspannung-Schlupf-Kurven, der Kalibrierung von entsprechenden Modellen und der Untersuchung des Versagensverhaltens wurden im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der HAW Kiel eine Reihe von Pull-Out-Versuchen nach [10] durchgeführt. Anschließend wurden die Probekörper aufgesägt und fotodokumentiert, um die Versagensart festzustellen. In Abbildung 3 (links) sind beispielhaft die experimentell ermittelten Verbundspannung-Schlupf-Kurven einer Serie (DBS C15 Carbonfaserbewehrung und Beton der Druckfestigkeitsklasse C50) sowie das auf Grundlage der Versuchsdaten kalibrierte Modell entsprechend Gl. 1 dargestellt. Hierbei lässt sich eine große Streuung feststellen. Im Mittel bildet das Modell das stabtypische Verbundverhalten jedoch gut ab. Abbildung 3 (rechts) zeigt, dass die Betondruckfestigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundfestigkeit hat, diese jedoch auch in hohem Maße von der FVK-Bewehrung bestimmt wird.

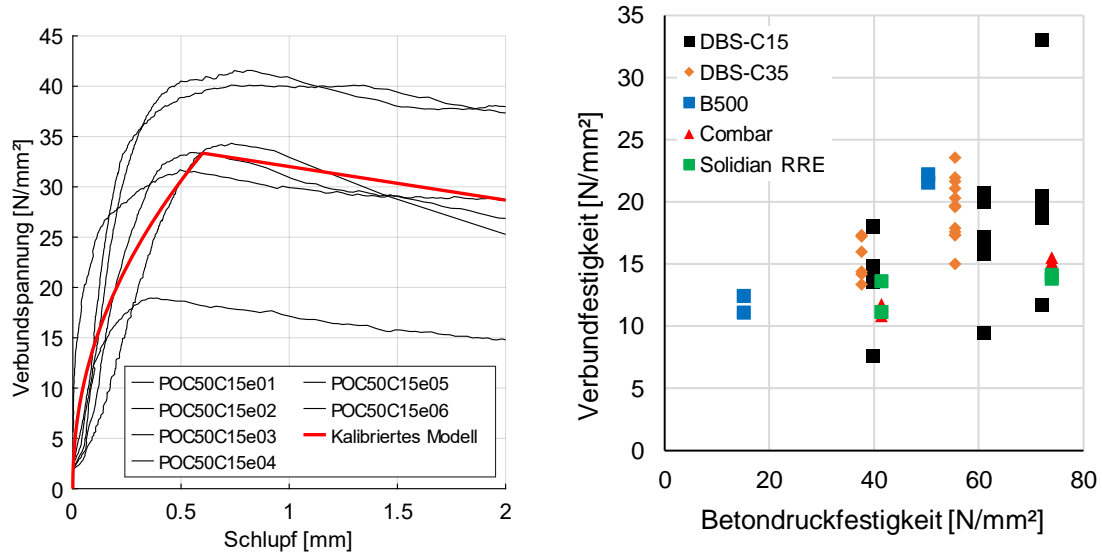


Abbildung 3: Experimentelle Verbundspannung-Schlupf-Kurven einer Serie und kalibriertes Modell (links) und maximale Verbundspannung über der Betondruckfestigkeit (rechts)

Die geprüften Stäbe Betonstahl B500, Schöck Combar und Solidian RRE lassen sich hinsichtlich ihres Versagens eindeutig zuordnen (Abbildung 4). Beim Betonstahl tritt, wie zu erwarten, ein Abscheren der Betonkonsole ein. Ähnliches Verhalten konnte auch bei dem Combar beobachtet werden, wobei jedoch eine zu vernachlässigende Beschädigung der Staboberfläche auftrat. Bei dem Bewehrungsstab Solidian RRE versagte die Umwicklung der Bewehrung, indem diese sich vom Stabkern ablöste. Es wurde weiterhin festgestellt, dass der entsprechende Versagensmodus unabhängig von der Betonfestigkeit eintritt.



Abbildung 4: Aufgesägte Probekörper mit Betonstahl (links), Schöck Combar (mitte) und Solidian RRE (rechts)

Betrachtet man die Versagensbilder der Stäbe DBS C15 und C35 (Abbildung 5) kann man eine Abhängigkeit der Versagensart von der Betonfestigkeit feststellen. Bei einer hohen Betonfestigkeit schert die ausgeprägte Rippung der Stäbe ab. Ist die Betonfestigkeit niedriger, versagt jedoch die Betonkonsole.



Abbildung 5: Aufgesägter Probekörper mit Carbonbewehrung DBS-C Abscheren der Betonkonsole (links) und Abscheren der Profilierung des Stabes (rechts)

#### 4. Parameterstudie

Um zu bestimmen, welche Kennwerte des Verbundes einen maßgebenden Einfluss auf die Rissbildung und die Verankerung von FVK-bewehrten Bauteilen haben, wurden auf Grundlage der numerischen Lösung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes Berechnungen durchgeführt, bei denen diese Parameter variiert wurden (Abbildung 6).

Bei der Berechnung der Rissbreite wurde der E-Modul der Bewehrung ( $E_{nm}$ ), die maximale Verbundspannung ( $\tau_{bm}$ ) und die Verbundsteifigkeit ( $\alpha$ ) variiert.

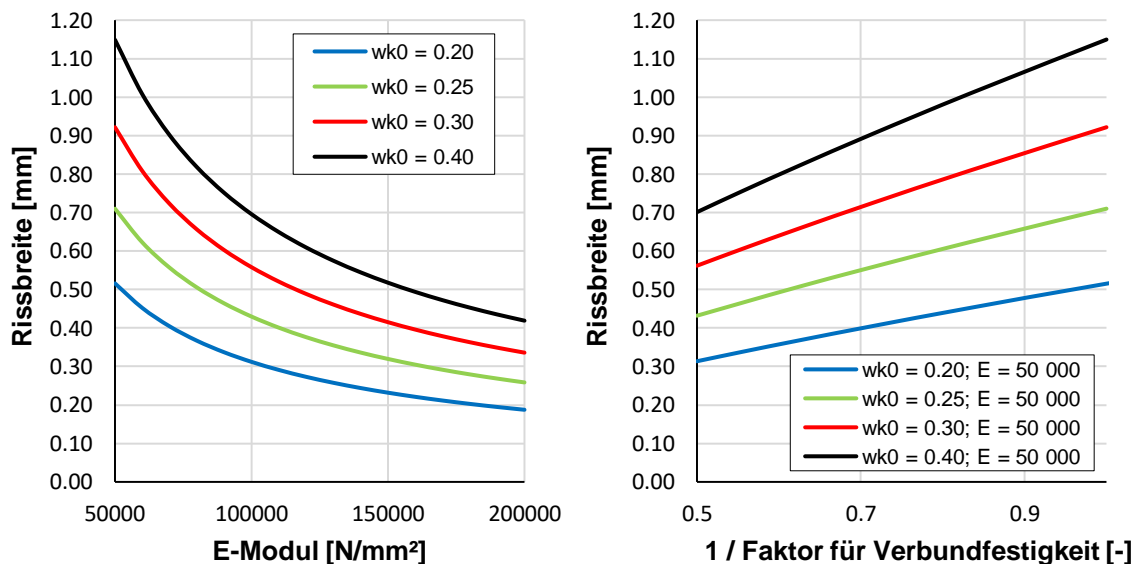


Abbildung 6: Einfluss des E-Moduls und der Verbundfestigkeit auf die Rissbreite

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Mit einer Reduzierung des E-Moduls geht eine Vergrößerung der Rissbreite einher. Die Reduzierung ist jedoch deutlich unterproportional, da sich bei einer Reduzierung des E-Moduls auf 1/4 lediglich die 2,7-fache Rissbreite ergibt.

- Mit einer Erhöhung der Verbundfestigkeit ( $\tau_{bm}$  wird größer) reduziert sich die Rissbreite. Wird die Verbundsteifigkeit beispielsweise verdoppelt, ergibt sich die 0,6-fache Rissbreite.
- Bei Erhöhung der Verbundsteifigkeit ( $\alpha$  wird kleiner) reduziert sich die Rissbreite. Multipliziert man  $\alpha$  mit dem Faktor 0,5 ergibt sich eine um den Faktor 0,60 verminderte Rissbreite.

Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass sich der geringere E-Modul, der für Stäbe aus Glas- und Basaltfasern typisch ist, durch gute Verbundeigenschaften wie eine hohe Verbundfestigkeit und eine hohe Verbundsteifigkeit kompensieren lässt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der geringe E-Modul und hohe übertragbare Verbundkräfte zu einer größeren erforderlichen Betondeckung führen, die benötigt wird, um ein Spaltversagen zu vermeiden

Hinsichtlich der Berechnung der Verankerungslänge wurde der E-Modul der Bewehrung ( $E_{nm}$ ), die maximale Verbundspannung ( $\tau_{bm}$ ) und die Verbundsteifigkeit ( $\alpha$ ) variiert (Abbildung 7). Bei den Betrachtungen zum E-Modul lässt sich deutlich erkennen, dass mit einem für FVK-Stäbe typischen geringeren E-Modul die Verankerungslänge abnimmt, dies jedoch mit einer Erhöhung der erforderlichen Betondeckung einhergeht (Abbildung 7 links). Bei geringerem E-Modul resultiert aus einem größeren Schlupf eine höhere Verbundspannung an der lastzugewandten Seite, welche sich über eine kürzere Länge abbaut. Daraus resultiert auch die höhere erforderliche Betondeckung, da sich der Innendruck proportional zur Verbundspannung verhält. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen in [7]. Mit einer höheren Verbundfestigkeit resultiert eine kürzere Verankerungslänge bei erhöhter Betondeckung. Mit zunehmender Verbundsteifigkeit ( $\alpha$  wird kleiner) ergibt sich ebenso eine kürzere Verankerungslänge bei höherer erforderlicher Betondeckung.

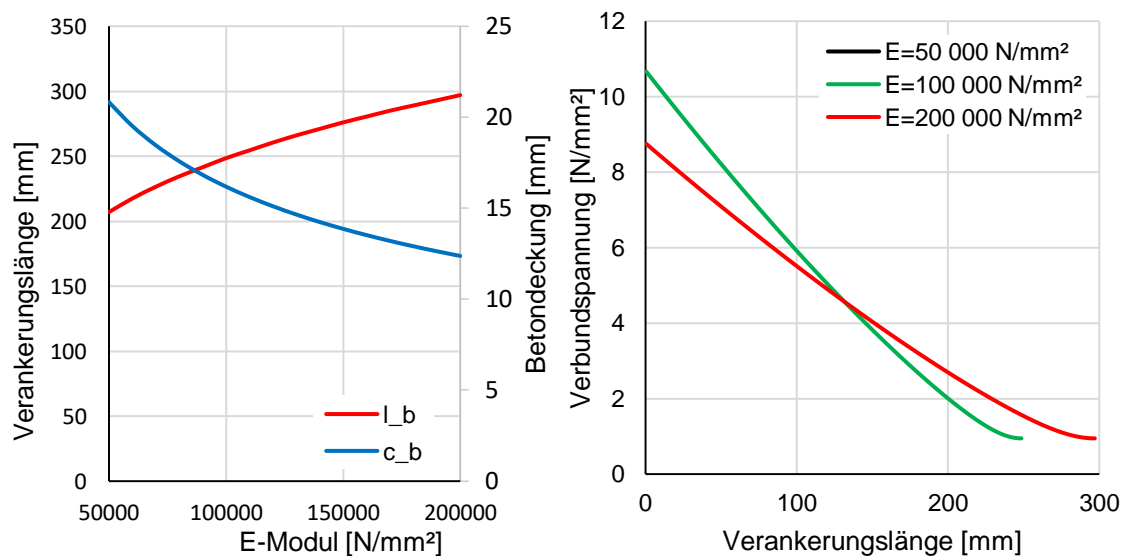


Abbildung 7: Rechnerische Verankerungslänge und Betondeckung über dem E-Modul (links) und Verbundspannungsverlauf über der Verankerungslänge für 3 verschiedene E-Moduli (rechts)

## 5. Datenbankauswertung

Die erstellte Datenbank beinhaltet Versuchsdaten aus 996 Verbundversuchen mit FVK- und Stahlbewehrung aus den Jahren 1996 bis 2023 aus 15 verschiedenen Quellen. Erfasst wurden, soweit möglich, Angaben zur Bewehrung (wie Stabdurchmesser, Festigkeit und E-Modul), Angaben zum Beton (wie Druck- und Zugfestigkeit), Angaben zum Versuch und die Versuchsergebnisse (wie die Verbundfestigkeit, den dazugehörigen Schlupf und die Versagensart).

In einer ersten Auswertung wurden bestimmte Versuchsparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf das Verbundverhalten untersucht. So lässt sich für die Parameter Betondruckfestigkeit und bezogene Rippenfläche ein etwa proportionaler Einfluss auf die Verbundfestigkeit erkennen (Abbildung 8). Perspektivisch soll die Datenbank dazu dienen, einen eigenen allgemeinen Ansatz für eine Verbundspannung-Schlupf-Beziehung zu evaluieren.

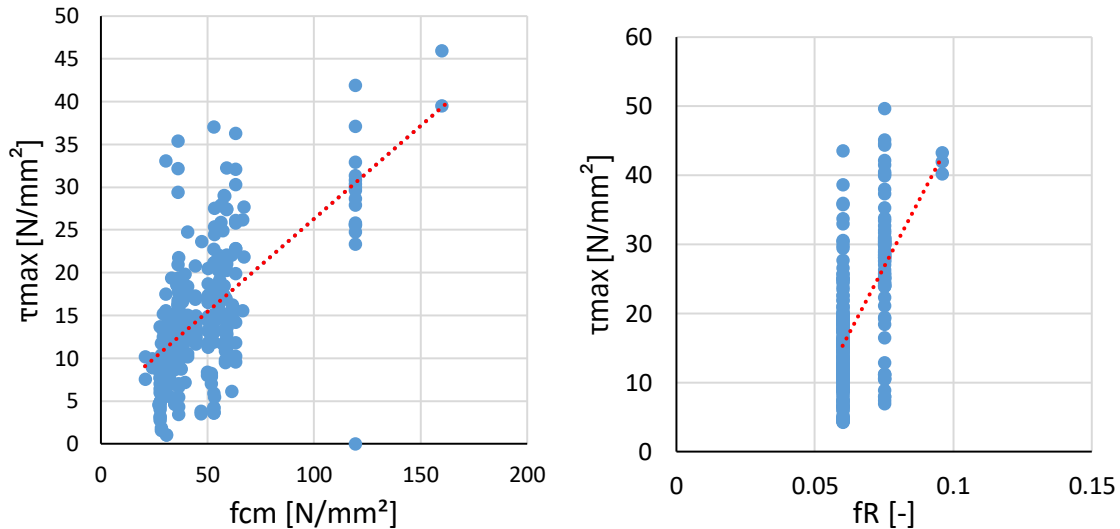


Abbildung 8: Darstellung der Verbundfestigkeiten über der Betondruckfestigkeit (links) und der bezogenen Rippenfläche (rechts)

## 6. Finite-Elemente-Berechnungen

Um den Kraftverlauf und den Spannungszustand im inneren des Bauteils bei Verbundkraftübertragung analysieren zu können, wird ein nichtlineares Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) mit der Software ATENA [11] erstellt (Abbildung 9).

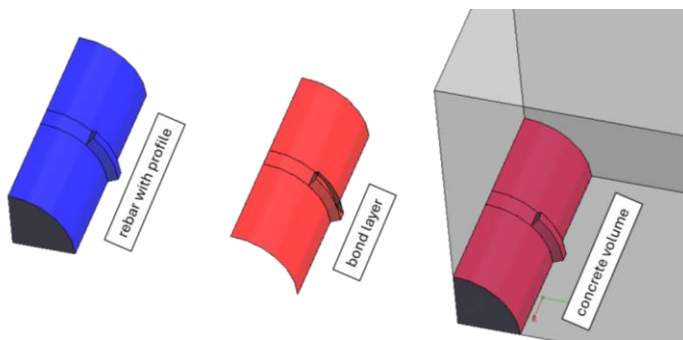


Abbildung 9: 3D-FE-Modell eines profilierten Bewehrungsstabes in Beton

Hierbei wurden zunächst die Geometrie eines profilierten Bewehrungsstabes abgebildet und geeignete Materialmodelle ausgewählt. Der Verbundbereich wird in Anlehnung an [12] mit einem Interface-Material mit Coulombschen Bruchkriterium mit Zugfestigkeit und Restreibung abgebildet. Dieses Modell soll anhand der durchgeführten Pull-Out-Versuche verifiziert und im nächsten Schritt für eine Parameterstudie verwendet werden.

## 7. Anwendungsbeispiel Uferwand

Neben theoretischen Untersuchungen, die in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellt wurden, konnte die Anwendung von Betonbauteilen mit FVK-Bewehrung bereits in der Praxis erprobt werden. Im Rahmen der Instandsetzung einer Uferwand in Kiel-Hasselfelde hat sich das Tiefbauamt der Landeshauptstadt Kiel dazu entschlossen, in einem Pilotprojekt gemeinsam mit der HAW Kiel eine nichtrostende Bewehrung aus Basaltfaserstäben einzusetzen [13]. Bei der ca. 110 m langen Uferwand handelt es sich um eine rückverankerte Spundwandkonstruktion.

Zur Herstellung von zwei Fertigteilen der Betonvorsatzschale wurden die Bewehrungsstäbe B-32 der Deutschen Basaltstab GmbH eingesetzt. Die Bauteile wurden statisch für die Lastfälle Eigengewicht, Anheben des Fertigteils, Wellenschlag vor Hinterfüllen der Fertigteilwand und Frischbetondruck beim Betonieren der Hinterfüllung bemessen. Die Biegebemessung erfolgte mittels Iteration der Dehnungsebene. Im Bereich der Lasteinleitung durch die Einbauteile wurde ein Durchstanznachweis geführt und eine Rückhängebewehrung bemessen. Der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung erfolgte auf Grundlage von Versuchsergebnissen der Pull-Out-Versuchen, welche an der HAW Kiel durchgeführt wurden, und der DGL des verschieblichen Verbundes.



Abbildung 10: Einheben des Fertigteils auf der Baustelle (links) BFVK-Bewehrungskorb im Fertigteilwerk (rechts)

Da das Fertigteil lediglich im Bauzustand belastet wird und im Endzustand nur noch den Korrosionsschutz sicherstellt, konnte auf die Beantragung einer Zustimmung im Einzelfall verzichtet werden. Auflage war es jedoch, dass die Tragfähigkeit eines baugleichen Elementes experimentell überprüft wird. Hinsichtlich der Herstellung im Fertigteilwerk (Abbildung 10 rechts) und dem Einbau auf der Baustelle (Abbildung 10 links) ließen sich keine negativ zu bewertenden Abweichungen zu einem Stahlbetonfertigteil feststellen.

### Literaturverzeichnis

- [1] G. König und N. V. Tue, *Grundlagen des Stahlbetonbaus: Einführung in die Bemessung nach DIN 1045-1*, 2. Aufl. (Teubner Studienbücher Bauwesen). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003.
- [2] L. J. Malvar, "Bond Stress-slip characteristics of frp rebars," Naval Civil Engineering Laboratory, TR-2013-SHR, 1994.

- [3] E. Cosenza, G. Manfredi und R. Realfonzo, "Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete," *J. Compos. Constr.*, Jg. 1, Nr. 2, S. 40–51, 1997, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1997)1:2(40).
- [4] fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Hoboken: Wiley, 2013.
- [5] R. Tepfers, "A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars," Dissertation, Division of Concrete Structures, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1973.
- [6] L. Ritter, "Der Einfluss von Querkraft auf den Verbund zwischen Beton und Betonstahl," Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-132733>
- [7] C. Caspari, "Zur Verbundverankerung von Glasfaserkunststoffbewehrungsstäben in Betonbauteilen unter Kurzzeit- und Langzeitbeanspruchung," Dissertation, Fachbereich, Technischen Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2022.
- [8] A. Schumann, "Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices," Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2020.
- [9] R. Füllsack-Köditz, *Verbundverhalten von GFK-Bewehrungsstäben und Rissentwicklung in GFK-stabbewehrten Betonbauteilen* (Zugl.: Weimar, Univ., Diss., 2004) (Schriftenreihe des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar 1). Weimar: Univ.-Verl., 2004.
- [10] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Hg. *Erläuterungen und Beispiele zur DAfStb-Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung"*, 1. Aufl. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 660). Berlin: DIN Media GmbH, 2024.
- [11] Červenka Consulting s.r.o., *ATENA Science (GiD 16.1 + ATENA Studio x64 V 5.9.1)*.
- [12] D. Schlicke, C. Krenn, M. Mayer und C. Betschoga, "FE-basierte Verifikation der Rissbreitenberechnung nach DAfStb-Heft 466," *Beton und Stahlbetonbau*, Jg. 117, Nr. 9, S. 666–679, 2022, doi: 10.1002/best.202200055.
- [13] S. Görtz, K. Lengert, T. Janßen und M. Felgentreff, "Anwendung von nichtmetallischer Bewehrung bei der Instandsetzung von Uferwänden," *Konstruktiver Ingenieurbau*, 1/2025, S. 21–29, 2025.



This work is licensed under CC BY 4.0.  
To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Kontakt:**

Hochschule für angewandte Wissenschaft Kiel

Kay Lengert, M.Sc.

Grenzstraße 3

24149 Kiel

Tel.: +49 431 210 4643

E-Mail: [Kay.lengert@haw-kiel.de](mailto:Kay.lengert@haw-kiel.de)

[www.haw-kiel.de/fachbereiche/medien-bauwesen/bauwesen](http://www.haw-kiel.de/fachbereiche/medien-bauwesen/bauwesen)