

B5 Umbau / Erneuerung
B6 betrieblicher Energieersatz
B7 betrieblicher Wasserersatz
C1 Rückbau, A
C2 T...

werks (i. d. R. 50 Jahre)

Bestandshalter

daster



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Lehrstuhl
Hybride Konstruktionen - Massivbau

28. Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT2024

2. Mai 2024

Ressourcen- und
energieeffiziente
Konstruktionen



Tagungsband

28. Brandenburgischer
Bauingenieurtag
BBIT2024

2. Mai 2024

BTU Cottbus - Senftenberg

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher
Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau

Impressum

Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
IKMZ – Universitätsbibliothek
2024

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher
Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau
Konrad-Wachsmann-Allee 2
03046 Cottbus
T +49 (0)355 69 - 2471
F +49 (0)355 69 - 2478
E fg-hybride-konstruktionen-massivbau@b-tu.de
www.b-tu.de/fg-hybride-konstruktionen-massivbau

Lizenzbestimmung: Es gilt das deutsche Urheberrecht. Das Dokument darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei genutzt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden.

Schriftenreihe Hybride Konstruktionen - Massivbau
2024 - Heft 16

ISSN 2569-2798
ISBN 978-3-940471-77-2
DOI: <https://doi.org/10.26127/BTUOpen-6689>

Thema: Ressourcen- und energieeffiziente Konstruktionen

Der 28. Brandenburgische Bauingenieurtag 2024 an der BTU Cottbus-Senftenberg widmet sich den angestrebten Zielen einer Ressourcen- und Klimaneutralität. Möglich wird dies durch innovative Ansätze und interdisziplinäre Planungs-, Bau- und Betriebsprozesse. Die Referenten zeigen Herausforderungen und Lösungen bei der Entwicklung klimaneutraler Baustoffe und Bauteile sowie deren Weiterverwendung und Kreislauffähigkeit. Darüber hinaus werden Erkenntnisse zur Ertüchtigung und Erhaltung vorhandener Bausubstanz sowie zu leichten, hybriden und adaptiven Konstruktionsansätzen vorgestellt.

Ausgerichtet wird der BBIT2024 vom Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher in enger Zusammenarbeit mit dem Förderverein Konstruktiver Ingenieurbau e.V. und den folgenden Kooperationspartnern:



Programm

- 9:00 **Begrüßung**
Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher
BTU Cottbus-Senftenberg,
Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau
- 9:15 **Grußwort und Preisverleihung**
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Hübner
BTU Cottbus-Senftenberg,
Vizepräsident für Forschung und Transfer
- 9:30 **Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz von Zement und Beton - Hinweise für die Praxis** Seite 7
Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller
VDZ Technology gGmbH
- 10:10 **Kreislaufwirtschaft in der Gebäudeplanung ermöglichen** Seite 13
Jakob Weigele
Madaster Germany GmbH
- 10:50 **Kaffeepause**
- 11:20 **100 Jahre zusätzliche Lebensdauer für die Nibelungenbrücke Worms! Wie kann das gelingen?** Seite 25
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
TU Dresden, Institut für Massivbau
- 12:00 **Ressourcen- und energieeffiziente hybride Konstruktionen** Seite 41
Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher, Tim Höltke, Dr.-Ing. Yangwen Zhang,
Robert Jirasek, Paul Marker
BTU Cottbus-Senftenberg
Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau
- 12:40 **Mittagspause**
- 13:40 **Die Strukturen der Zukunft: leicht, adaptiv, kreislauffähig** Seite 61
Prof. Dr.-Ing. M.Arch. Lucio Blandini
Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau
Entwerfen und Konstruieren
- 14:20 **Bemessung von Holzbetonverbunddecken nach DIN CEN/TS 19103 und geplantem Nationalen Anhang** Seite 67
Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Schänzlin
Hochschule Biberach, Institut für Holzbau
- 15:00 **Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme** Seite 89
Prof. Dr.-Ing. Christian Glock
RPTU Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
- 15:40 **Schlussworte, Get-Together**

Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz von Zement und Beton - Hinweise für die Praxis

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH
christoph.mueller@vdz-online.de

1. Zement und Beton: Auf die Mischung kommt es an

Beton in seiner einfachsten bzw. ursprünglichsten Form besteht aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser. Das ist heute allerdings nur noch sehr selten der Fall. Meistens enthalten moderne Betone zudem noch mindestens einen Betonzusatzstoff sowie Betonzusatzmittel. Fasern oder Pigmente kommen je nach Anwendungsfall hinzu. An diese Seite natürlicher Gesteinskörnungen wie Kies und Sand treten rezyklierte Gesteinskörnungen z. B. aus der Aufbereitung von Altbeton. Die historische Entwicklung von Zement ist ähnlich: Der Portlandzement mit nur einem Hauptbestandteil ist vielfach Zementen mit zwei oder drei Hauptbestandteilen gewichen. Doch warum haben sich sowohl Zement als auch Beton zu hybriden Multi-Komponenten-Systemen entwickelt? Der Blick zurück und nach vorne zeigt: Die Mischung macht's.

Etwa 7 % der Erdkruste besteht aus Kalkstein. Dies ist weltweit die Grundlage für die Betonbauweise. Denn Kalkstein ist der Grundstoff zur Herstellung des Portlandzementklinkers. Jedes Jahr wird global rd. 4,5 Milliarden Tonnen Zement hergestellt und angewendet. Damit verbunden sind etwa 2,5 - 2,7 Milliarden Tonnen in die Atmosphäre emittiertes CO₂. Hintergrund ist, dass bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Zementklinker große Mengen an CO₂ freigesetzt werden. Rund zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und rund ein Drittel auf energiebedingte CO₂-Emissionen aus dem Einsatz der Brennstoffe (Abb. 1).

Seit 1990 ist es gelungen, die CO₂-Emissionen der Zementherstellung in Deutschland sowohl spezifisch als auch absolut in einer Größenordnung von 20 bis 25 % zu reduzieren. Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: Erstens die Senkung der Klinkergehalte im Zement und zweitens der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe, durch die fossile Energieträger mehrheitlich ersetzt wurden. Die vollständige Dekarbonisierung von Zement und Beton bis zum Jahr 2045 macht Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Eine Studie [1] betrachtete deshalb einen breiten Mix von Minderungsoptionen auf allen fünf Wertschöpfungsstufen der Betonbauweise (Klinker/Zement/Beton/Bauwerk/ CO₂-Aufnahme im Beton) und stellt diese anhand des Szenarios Klimaneutralität dar. Ausgangspunkt war die Frage, wie die heutigen CO₂-Emissionen der Zementindustrie in Deutschland von rund 20 Mio. Tonnen bis 2045 auf Netto-Null gesenkt werden können.

Zur Herstellung von Zement und Beton wurden im Jahr 2020 zudem ca. 236 Mio. t mineralische Primärrohstoffe und fossile Brennstoffe eingesetzt. Dies entspricht etwa 20 % der in Deutschland eingesetzten natürlichen Rohstoffe. Auf die Zementproduktion entfielen dabei rd. 44 Mio. t Primärrohstoffe sowie rd. 1 Mio. t fossile Brennstoffe. Zusätzlich kamen alternative Roh- bzw. Brennstoffe (rd. 7 Mio. t bzw. rd. 4 Mio. t) zum Einsatz. Die verwendeten Brennstoffe wurden energetisch sowie stofflich verwertet. So konnten 2,5 Mio. t Kohle bzw. 2,4 Mio. t CO₂ eingespart werden. Insgesamt wurden 2020 in Deutschland zur Herstellung von Beton und Mörtel etwa 192 Mio. t Kies, Sand und Natursteine eingesetzt. Die Menge recycelter Gesteinskörnungen in der Betonherstellung betrug ungefähr 0,9 Mio. t [3].

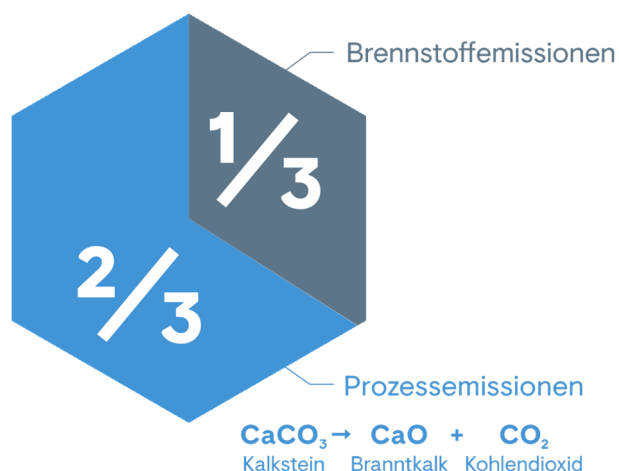


Abb. 1: Direkte CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung (Quelle: VDZ)

2. CO₂-effiziente Zemente

Um die CO₂-Emissionen durch die Substitution des Portlandlandzementklinkers zu ersetzen, bedarf es leistungsfähiger Materialien, die in ausreichender Menge und zu wirtschaftlichen Konditionen verfügbar sind. Die Verwendung von klinkereffizienten Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hat in Deutschland eine lange und erfolgreiche Tradition. Portlandhüttenzemente CEM II-S und Hochofenzemente CEM III mit Hüttsand als Hauptbestandteil neben dem Portlandzementklinker werden seit mehr als einem Jahrhundert industriell hergestellt und verwendet. Heute werden Hochofenzemente CEM III/A mit etwa 50 % Portlandzementklinker in einigen Regionen als Regelzemente für die Herstellung von Transportbeton im Hoch- und Ingenieurbau verwendet. Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL mit 80-85 % Portlandzementklinker werden in Deutschland seit Beginn der 1980er Jahre hergestellt und im Beton eingesetzt.

Die Einführung erfolgte zunächst über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen. Im Jahre 1994 wurden Portlandkalksteinzemente in Deutschland, damals noch in der nationalen Zementnorm DIN 1164-1, gemeinsam mit weiteren Portlandkompositzementen genormt. Von regionaler Bedeutung sind zum Beispiel Portlandölschieferzemente. Einige deutsche Zementhersteller haben in den vergangenen ca. 20 Jahren zudem Portlandkompositzemente CEM II/A-M und CEM II/B-M mit Portlandzementklinkergehalten zwischen 65 und etwa 85 % entwickelt und in den Markt eingeführt. Vor diesem Hintergrund hat der Anteil der Portlandzemente CEM I am Inlandversand kontinuierlich abgenommen und der der CEM II-Zemente entsprechend zugenommen. Die Zusammensetzung der Zemente hängt von der jeweiligen Zementart und den in den Zementnormen definierten Mengenanteilen ab. Die Zemente weisen je nach Anwendung im Beton unterschiedliche Leistungsmerkmale auf. Diese sind aus bautechnischer Sicht von Bedeutung, weil damit Betone für unterschiedliche Anwendungen hergestellt werden können. In CEM II/C-Zementen kann der Klinkergehalt auf bis zu 50 M.-% reduziert werden. So lassen sich beispielsweise Zemente mit 20 M.-% nicht gebranntem Kalkstein und bis zu 30 M.-% eines anderen Hauptbestandteils wie Hüttsand, Flugasche, gebranntem Schiefer oder auch getemperten Puzzolanen herstellen. Durch die Kombination der in ihrem Aufkommen limitierten Ausgangsstoffe Hüttsand und Flugasche mit ungebranntem Kalkstein wird ihre Reichweite erhöht. Bei modernen CO₂-effizienten Zementen handelt es sich somit heute vielfach um ein hybrides Multi-Komponenten-System (Abb. 2).

CO₂-effiziente Zemente und Betone können in fast allen typischen Anwendungsbereichen des Hoch- und Tiefbaus verwendet werden. Das Minderungspotenzial ist vor allem bei Innenbauteilen und üblichen Außenbauteilen des Hochbaus groß, denn dort werden rund 60 – 80 % des Transportbetons in Deutschland eingesetzt.



Abb. 2: Ausgangsstoffe eines modernen klinkereffizienten Zements (Quelle: VDZ)

Diese Betonanwendungen sind in der Regel geringen bzw. moderaten Umwelteinwirkungen ausgesetzt, sodass sie sich sehr für den Einsatz besonders CO₂-effizienter Zemente im Beton eignen. Hierdurch lassen sich ohne technische Einschränkungen bereits heute CO₂-Einsparungen von ca. 20 % pro m³ Beton im Vergleich zum Durchschnitt erreichen. Hier sind z. B. Betone auf der Basis von CEM III/A oder neuen CEM II/C-M (S-LL) - Zementen besonders relevant. Sie verbinden zwei Vorteile: signifikante CO₂-Einsparungen und ein breites Spektrum von Bauanwendungen. Im mehrgeschossigen Hochbau bietet der Einsatz dieser CO₂-reduzierten Betone in vergleichsweise CO₂-intensiven konstruktiven Bauteilen wie Decken, Wänden sowie bei Bodenplatten und Fundamenten erhebliches Einsparpotenzial. Für ausgewählte Anwendungen und Innenbauteile kann künftig der Einsatz besonders CO₂-effizienter CEM VI-Zemente eine Lösung sein. Diese werden derzeit entwickelt (Abb. 3). Mit Blick auf die Planung, Ausschreibung und Vergabe ist es wichtig, diese CO₂-effizienten Zemente und Betone gezielt am Markt nachzufragen.

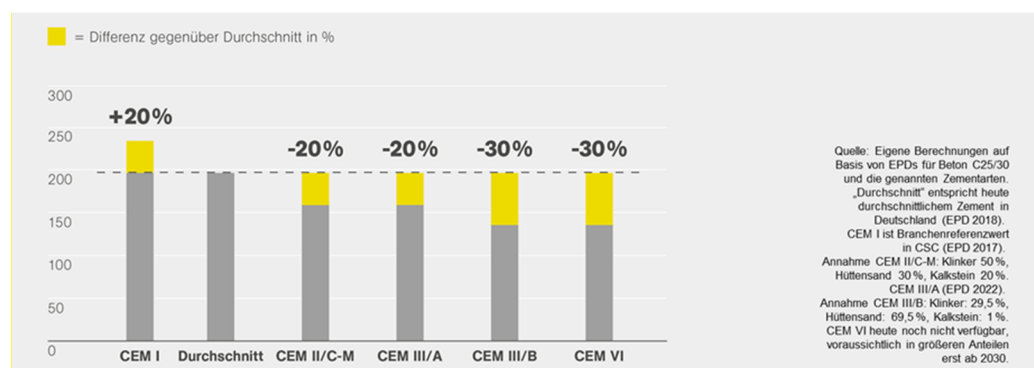


Abb. 3: CO₂-Fußabdruck von Beton (C25/30) mit verschiedenen Zementen in kg C CO₂-Äq/ m³ (Quelle: IZB)

Gemäß der Dekarbonisierungs-Roadmap des VDZ [1] wird die Verwendung klinkereffizienter Zemente in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Werden die ambitionierten Ziele der Roadmap umgesetzt, beträgt die kumulierte CO₂-Minderung durch klinkereffiziente Zemente bis 2045 etwa 60 Mio. t.

3. Recyclingmehl im Zement und rezyklierte Gesteinskörnungen

Der Einsatz von aufbereitetem feinem Betonbruch („Recyclingmehl“) im Zement trägt dazu bei, mineralische Stoffkreisläufe zu schließen, den Anteil des Portlandzementklinkers im Zement zu reduzieren und damit CO₂-Emissionen zu verringern. In Deutschland sind erste Zemente mit Recyclingmehl als Nebenbestandteil auf dem Markt. Sie benötigen eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Anwendung und die entsprechende Zementnorm ist vorhanden. Im Zuge von Forschungsvorhaben konnte zudem bereits gezeigt werden, dass auch mit höheren Anteilen als Hauptbestandteil im Zement leistungsfähige Betone hergestellt werden können. Zemente mit bis zu 30 M.-% Brechsand können mindestens in Innenbauteilbetonen eingesetzt werden. Auch Außenbauteile des Hochbaus erscheinen möglich. In Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung kann durch aktive Carbonatisierung (Mineralisierung) des enthaltenen Zementsteins zudem u. a. die Festigkeitsentwicklung von Zementen begünstigt werden. Dies ermöglicht es in Zukunft, die Einbindung von CO₂ mit der weiteren Reduktion des Klinkerfaktors in Zementen zu kombinieren.

Gemäß der Ressourcen-Roadmap des VDZ [3] wird auch die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen zum Beispiel aus aufbereitetem Altbeton in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Werden die ambitionierten Ziele der Roadmap umgesetzt, beträgt die kumulierte Einsparung von Primärressourcen durch rezyklierte Gesteinskörnung bis 2050 etwa 840 Mio. t. Es gibt somit vielfältige Möglichkeiten der stofflichen Wiederverwendung von Beton (Abb. 4).



Abb. 4: Stoffliche Wiederverwendung von Beton:
Vielfältige Möglichkeiten (Quelle: VDZ)

4. Zusammenfassung

Auf dem Weg zu einer klimaneutralen und noch weiter ressourcenoptimierten Betonbauweise ist ein umfangreicher Maßnahmen-Mix entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton notwendig. So lassen sich bereits heute bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit bevorzugt Betone unter Verwendung CO₂-effizienter Zemente (z. B. CEM II- bzw. CEM III-Zemente) einsetzen. Dabei sind regionale Unterschiede in der Verfügbarkeit der Zemente bzw. der für ihre Herstellung notwendigen Rohstoffe zu beachten. Zudem bieten CO₂-effiziente Bauteile und Konstruktionen aus Beton weitere Potenziale. Mit Blick auf die Planung, Ausschreibung und Vergabe ist es wichtig, diese CO₂-effizienten Zemente und Betone gezielt am Markt nachzufragen. Eine gute Orientierung über die CO₂-Minderung bei Betonen verschiedener Betondruckfestigkeitsklassen durch den Einsatz von Zementen mit reduziertem Klinkeranteil bietet das CO₂-Modul des Concrete Sustainability Council. Betone der CSC Level 1 und 2 sind in der Regel in Innenbauteilen und üblichen Außenbauteilen des Hochbaus einsetzbar und in den

meisten Regionen bereits heute verfügbar. Die Verwendung CO₂-effizienter Zemente wird in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Werden die ambitionierten Ziele der VDZ-Roadmap umgesetzt, beträgt die kumulierte CO₂-Minderung durch diese Zemente bis 2045 etwa 60 Mio. t. Gemäß der Ressourcen-Roadmap des VDZ können durch die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen zudem bis 2050 etwa 840 Mio. t Primärressourcen durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden.

Referenzen

1. Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Ed.), 2020. Dekarbonisierung von Zement und Beton, <https://www.vdz-online.de/dekarbonisierung>
2. InformationsZentrum Beton, IZB (Ed.), 2023. Nachhaltig Bauen. Mit Beton, <https://www.nachhaltig-bauen-mit-beton.de>
3. Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Ed.), 2022. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton - Potenziale und Handlungsstrategien, <https://www.vdz-online.de/ressourcenschonung>

Hrsg.: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos,
Johann-Dietrich Wörner

Beton-Kalender 2024

Hochbau; Digitales Planen und Baurobotik

- Entwurf, Bemessung und Konstruktion von Hochhäusern aus Stahlbeton in Deutschland
- 3D Architektur- und Tragwerksplanung, digitales Monitoring von Bauwerken, Anwendung von KI-Methoden in den frühen Phasen des Gebäudeentwurfes
- Bauautomatisierung und Robotik im Betonbau

Hrsg.: Ulrike Kuhlmann

Stahlbau-Kalender 2024

Eurocode 3 - neue Anwendungsnormen

- aktueller Stand der Stahlbau-Regelwerke
- Hintergründe und Erläuterungen zu den Regelungen der zukünftigen, zweiten Eurocode-Generation
- praxisnahe Beispiele zur Berechnung typischer Stahlkonstruktionen, wie z. B. Windenergieanlagen oder Strukturen aus Winkelprofilen

Hrsg.: Nabil A. Fouad

Bauphysik-Kalender 2024

Klimagerechtes Bauen; Brandschutz

- Bewertungstools zum klimagerechten Bauen
- Aktuelles zum sommerlichen Wärmeschutz
- Brandschutz im Holzbau bis zur Hochhausgrenze
- Materialtechnische Tabellen auf aktuellem Stand

Hrsg.: Detleff Schermer, Eric Brehm

Mauerwerk-Kalender 2024

Klimagerechtes und nachhaltiges Bauen; Befestigungen; Bauen im Bestand

- Ansätze zur Berücksichtigung der Recarbonatisierung von zement- und kalkgebundenen Mauersteinen
- Stand der Technik bei Befestigungen im Mauerwerk, einschl. Befestigung absturzsichernder Fenster
- Bauwerksdiagnostik für Sanierungskonzepte historischer Eisenbahngewölbebrücken

BESTELLEN

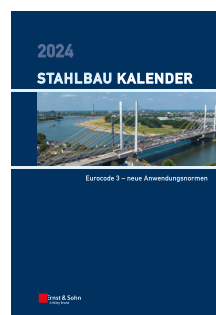
+49 (0)30 470 31-200
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/bücher



2023 · 976 Seiten · 696 Abbildungen ·
140 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03406-4 € 184*

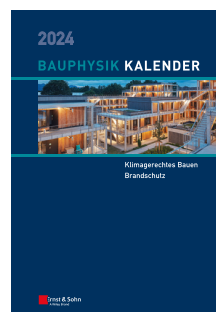
eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03407-1 € 234*



2024 · 752 Seiten · 408 Abbildungen ·
159 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03415-6 € 159

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03420-0 € 194*



2024 · 640 Seiten · 404 Abbildungen ·
157 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-30002-2 € 159

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-30003-9 € 194*



2024 · 592 Seiten · 479 Abbildungen ·
173 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03408-8 € 159

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03409-5 € 194

Kreislaufwirtschaft in der Gebäudeplanung ermöglichen

Jakob Weigele

Madaster Germany GmbH
jakob.weigele@madaster.com

1. Einleitung zur Kreislaufwirtschaft und deren praktische Umsetzung durch Cradle to Cradle [1] und Madaster

In einer Zeit, in der die Ressourcen unseres Planeten immer knapper werden und die Mengen des produzierten Abfalls stetig ansteigen, gewinnen nachhaltige Wirtschaftsmodelle an Bedeutung. Im Jahr 2018 veröffentlichte die Weltbank in Washington den Bericht «What a Waste 2.0», in diesem wird davon ausgegangen, dass das momentane Abfallaufkommen weltweit rund zwei Milliarden Tonnen entspricht – Tendenz steigend. Dafür sprechen die wachsenden Bevölkerungszahlen sowie die zunehmende Urbanisierung. Bis zum Jahr 2050 rechnet man mit rund 3,4 Milliarden Tonnen. Ein Drittel davon produzieren die sogenannten «hoch entwickelten Länder» wie die Schweiz, die Niederlande oder Schweden, die gleichzeitig nur rund 16 Prozent der Weltbevölkerung ausmachen. [2]

Doch das klare Schlusslicht hinsichtlich des prozentualen Abfallaufkommens nach Branchen-zweigen in Deutschland in Sachen Nachhaltigkeit und Ressourcenumgang ist tatsächlich die Immobilienbranche. Die Menge an Bau- und Abbruchabfällen belief sich im Jahr 2020 bundesweit auf 229,4 Millionen Tonnen, das entspricht 55,4 Prozent des Brutto-Abfallaufkommens. [3] Die Immobilienwirtschaft ist jedoch nicht nur hierzulande, sondern auch weltweit betrachtet, einer der größten Abfallproduzenten.

Besonders die Kreislaufwirtschaft zeigt, wie durch intelligente Produkt- und Materialnutzung eine Antwort auf die drängenden Fragen des Ressourcenverbrauchs und der Abfallreduktion gefunden werden kann. Das Cradle-to-Cradle-Konzept beschreibt eine nachhaltige Zukunft basierend auf der Kreislaufwirtschaft. Madaster widmet sich diesem Thema in der Bauwirtschaft mit einer Plattformlösung. Verbaute Materialien und Produkte werden dokumentiert und gespeichert. Nach dem Leitspruch „*Materialien eine Identität geben*“ kann Abfall reduziert werden und Materialien in Kreisläufe gebracht werden.

1.1 Die Kreislaufwirtschaft: Mehr als nur Recycling

Die Kreislaufwirtschaft bricht mit der traditionellen linearen Wirtschaftslogik von "Produzieren, Nutzen, Entsorgen" und stellt ein System vor, in dem Ressourcen in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Ziel ist es, Produkte und Materialien so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf zu halten und damit sowohl die Entstehung von Abfall zu minimieren als auch Ressourcen zu schonen. Dieser Ansatz fördert die Entwicklung von Produkten, die von vornherein für eine Wiederverwendung oder Recycling konzipiert sind. Neben den offensichtlichen ökologischen Vorteilen bietet die Kreislaufwirtschaft auch neue wirtschaftliche Chancen durch die Schaffung nachhaltiger Geschäftsmodelle und die Reduktion von Rohstoffkosten.

1.2 Cradle-to-Cradle: Vom Endloszyklus der Materialien

Das Cradle-to-Cradle-Konzept repräsentiert einen radikalen Wandel in der Produktentwicklung, der darauf abzielt, dass alle Materialien nach ihrem Lebenszyklus entweder als biologische Nährstoffe in die Erde zurückgeführt oder als technische Nährstoffe vollständig recycelt werden können. Die von Michael Braungart und William McDonough entwickelte Philosophie fordert

einen Designprozess, der Produkte kreiert, die nicht nur keinen negativen Einfluss auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit haben, sondern diese aktiv verbessern. Produkte werden so gestaltet, dass sie nach der Nutzung demontiert und ihre Bestandteile in neuen Produktionszyklen verwendet werden können, wodurch eine Abfallproduktion vermieden wird.

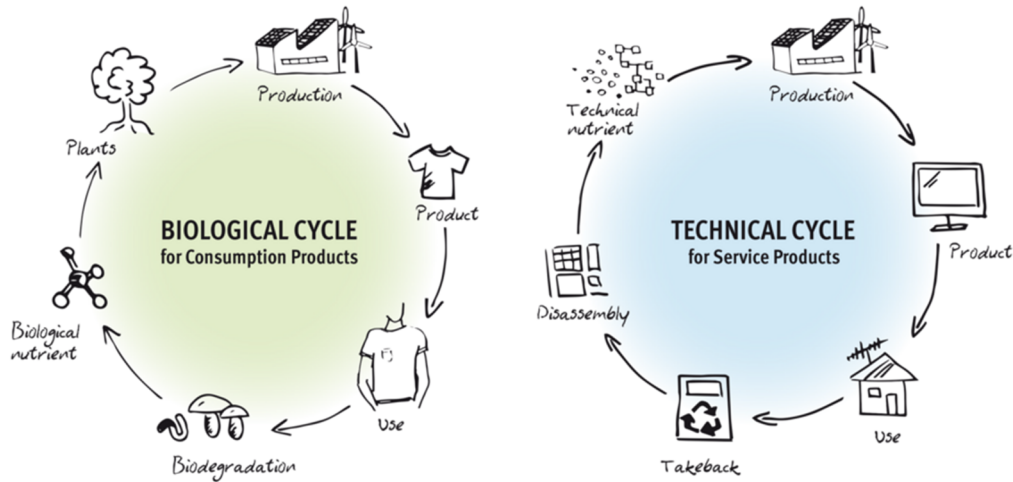


Abb. 1: Darstellung des Cradle-to-cradle-Prinzips [4]

Wie diese Kreislaufwirtschaft aussehen kann, zeigt die obige Grafik. Das Prinzip der Kreislaufwirtschaft kann auf alle Arten von Produkten angewandt werden, die Schritte sind immer gleich: Nach der Herstellung wird das Objekt der Wahl vom Verbraucher genutzt, bis ein Defekt vorliegt oder es durch eine neuere Variante ersetzt wird. Daraufhin erfolgt die Rückführung in den Stoffkreislauf. Wertstoffhöfe, Hersteller und spezialisierte Unternehmen nehmen die abgelegten Güter zurück, zerlegen sie in ihre Bestandteile und stellen diese wieder den Produzenten zur Verfügung.

1.3 Madaster: Das digitale Archiv für Baumaterialien

Madaster, ein Begriff, der sich aus den Worten "Material" und "Kataster" zusammensetzt, ist eine innovative Online-Plattform, die darauf abzielt, Gebäude als Lagerstätten von Materialien zu dokumentieren. Diese Idee geht auf den niederländischen Architekten Thomas Rau zurück, der Madaster 2017 gründete mit der Vision, eine Welt zu schaffen, in der Abfall als Material ohne Identität verstanden wird. Indem alle in einem Gebäude verwendeten Materialien und deren Wert erfasst werden, verwandelt Madaster Gebäude in eine "Materialbank", aus der Ressourcen für neue Bauprojekte gewonnen werden können. Diese Dokumentation ermöglicht es, Materialien am Ende ihres Lebenszyklus nicht als Abfall zu betrachten, sondern als wertvolle Ressourcen, die in die Kreislaufwirtschaft zurückgeführt werden können. Die Plattform fördert damit den Übergang zu einer nachhaltigen Bauindustrie, indem sie Transparenz über die Materialzusammensetzung von Gebäuden bietet und die Wiederverwendung von Baumaterialien erleichtert.

1.4. Integration von Theorie und Praxis

Die Integration von Cradle-to-Cradle und Madaster in die Bau- und Architekturbranche zeigt, wie theoretische Konzepte in praktische Lösungen für eine nachhaltigere Praxis überführt werden können. Diese Ansätze bieten nicht nur Lösungen für die Reduktion der Umweltauswirkungen der Bauindustrie, sondern öffnen auch wirtschaftliche Perspektiven durch die Schaffung von Werten aus bisher ungenutzten Ressourcen. Die vollständige Umsetzung dieser Konzepte erfordert allerdings eine weitreichende Zusammenarbeit aller Beteiligten sowie eine Anpassung

der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, um den Weg für eine kreislauforientierte Zukunft zu ebnet.

Wie das C2C-Prinzips in der Praxis aussieht, zeigen Kraaijvanger Architecten in den Niederlanden. Hier wurde im Jahr 2016 das weltweit erste ökologische Rathaus entwickelt. Das Gebäude verfügt über ein eigenes Gewächshaus in den obersten beiden von insgesamt 11 Stockwerken, das gemeinsam mit der vielfältig begrünten Nordfassade als «grüne Lunge» und Luftfilter der Immobilie dient. Die Glasfassade im Süden sorgt für eine natürliche Aufwärmung im Winter und ist gleichzeitig so konzipiert, dass sie einer Überhitzung im Sommer vorbeugt. Für die Energiegewinnung wurden 300 Quadratmeter Solarpaneele installiert. In einem künstlich angelegten Feuchtareal im Innenhof wird das Grauwasser des Rathauses natürlich aufbereitet zur Bewässerung und für die Toilettenspülung genutzt. Bereits während der Planung des Gebäudes wurden alle Informationen zu Bauteilen und Materialien in einem Materialpass erfasst. Dadurch weist das Gebäude alle Merkmale einer Materialbank auf. Das Ergebnis: Das Rathaus in Venlo ist energieneutral, recycelt Regen- und Abwasser und produziert im Falle einer Sanierung oder eines Rückbaus nahezu keinen Abfall. Neben der ressourcenschonenden Bauweise, dem nachhaltigen Betrieb und der damit einhergehenden Vorreiterrolle in Sachen C2C, wirkt die Immobilie dank der flächendeckenden Begrünung positiv auf die Luftqualität der Umgebung und die Biodiversität. [5] [6]

2. Anwendung der Kreislaufwirtschaft in der Praxis

Die allgemeine Anwendung der Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft nimmt an Fahrt auf, insbesondere durch innovative Konzepte wie Madaster, die ein umfassendes Materialkataster für Gebäude bieten. Madaster, gegründet 2017 in den Niederlanden vom Architekten Thomas Rau, zielt darauf ab, alle Bestandteile eines Gebäudes in einer Cloud-Plattform zu dokumentieren. Dies ermöglicht es, Gebäudebestandteile transparent darzustellen und fördert die Idee einer Welt ohne Abfall, indem jedes Bauteil und Produkt für eine weitere Nutzung demontiert und wiederverwendet werden kann. Durch die Einbeziehung von Unternehmen und Akteuren aus allen relevanten Bereichen der Bau- und Immobilienwirtschaft hat Madaster ein Ökosystem geschaffen, das Architekten, Projektentwickler, Banken, Asset Manager und Marktplätze miteinander verbindet.

Durch die Dokumentation und transparente Darstellung der verbauten Materialien und deren Eigenschaften wie Recyclingfähigkeit, Toxizität, CO₂-Fußabdruck und finanzieller Restwert, eröffnet Madaster Wege zur effektiven Wiederverwendung von Baumaterialien. Der Prozess der Dateneingabe, von der Nutzung von BIM-Modellen bis zu Leistungsverzeichnissen, ermöglicht es, von der Planungsphase bis zum Bestand, Transparenz über die Umwelteinflüsse der Materialien und den Materialwert einer Immobilie zu haben.

Die zunehmende Regulatorik, wie die EU-Taxonomie, die den Übergang zur Kreislaufwirtschaft explizit nennt und zukünftige Projekte zu mindestens 50 Prozent aus wiederverwerteten oder nachwachsenden Materialien bestehen sollen, setzt neue Maßstäbe. Auch die geplante Einführung eines digitalen Ressourcenpasses für Gebäude und Bauprodukte ab 2024 durch die Bundesregierung erhöht den Handlungsdruck auf Marktteilnehmer. Madaster bietet eine Lösung, sich frühzeitig auf diese Anforderungen einzustellen, indem es ein digitales Register für Materialien bereitstellt, das den Weg für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft ebnet.

Die Bedeutung der CO₂-Bilanz von Gebäuden, die Berücksichtigung von Material und grauer Energie sowie eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus rücken immer stärker in den Fokus. Madaster spielt eine Schlüsselrolle in dieser Entwicklung, indem es ermöglicht, Materialien eine Identität zu geben und sie als Ressource zu begreifen, die es immer wieder in Stoffkreisläufe einzubringen gilt. Durch die Erfassung und Verknüpfung von Objektelementen mit

konkreten Produktdatensätzen können zukünftig auch weitere Aspekte wie Materialgesundheit automatisiert analysiert werden.

Die Anwendung der Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft steht noch am Anfang, doch Initiativen wie Madaster sind ein entscheidender Schritt, um die Branche nachhaltiger zu gestalten. Durch die Schaffung transparenter Datenbanken für Baumaterialien und die Förderung der Wiederverwendung trägt die Bauwirtschaft aktiv zum Umweltschutz bei und geht den Weg in eine nachhaltige Zukunft.

3. Madaster: Die Plattform für zirkuläres Bauen

Die fortschreitende Digitalisierung und der wachsende Fokus auf Nachhaltigkeit transformieren die Bau- und Immobilienwirtschaft grundlegend. In diesem Kontext nimmt Madaster eine Schlüsselposition ein. Ihr Ziel ist es, Gebäude in nachhaltige Materiallager zu verwandeln und so den Grundstein für eine zirkuläre Bauwirtschaft zu legen.

3.1 Funktionen und Vorteile der Madaster-Plattform

Madaster schafft Transparenz über die in Bauwerken verwendeten Materialien und Bauteile, indem es diese erfasst, dokumentiert und hinsichtlich ihrer Recyclingfähigkeit, Toxizität, des CO₂-Fußabdrucks und ihres finanziellen Restwerts bewertet. Damit bietet die Plattform eine Vielzahl von Vorteilen:

Effizienzsteigerung im Bauprozess: Durch die Bereitstellung detaillierter Informationen über Materialien und ihre Eigenschaften können Planungs- und Bauentscheidungen optimiert werden. Dies führt zu effizienteren Bauprozessen und einer Reduktion von Abfall.

Förderung der Kreislaufwirtschaft: Madaster erleichtert die Identifizierung und Wiederverwendung von Bauteilen, was nicht nur die Ressourceneffizienz erhöht, sondern auch die Abhängigkeit von neuen, oft umweltschädlichen Materialien reduziert.

Unterstützung bei der Einhaltung von Vorschriften: Mit der EU-Taxonomie und nationalen Regulierungen, die den Einsatz recycelter Materialien fordern, wird die Dokumentation der Materialzusammensetzung immer wichtiger. Madaster bietet die notwendige Transparenz und Dokumentation, um diesen Anforderungen gerecht zu werden.

3.2 Integration in den Bau- und Planungsprozess

Die Integration von Madaster in den Bau- und Planungsprozess bietet eine nahtlose und effektive Möglichkeit, die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft umzusetzen:

Frühzeitige Einbindung in der Entwurfsphase: Bereits in der Planungsphase ermöglicht Madaster Architekten und Ingenieuren, nachhaltige Materialien zu wählen und deren Einsatz zu optimieren. Dies stellt sicher, dass die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft von Anfang an berücksichtigt werden.

Durchgängige Dokumentation während des Bauvorhabens: Während des Baus dient Madaster als zentrale Informationsquelle für alle beteiligten Parteien. Die Plattform erleichtert den Austausch von Materialinformationen und gewährleistet eine lückenlose Dokumentation, die für spätere Wiederverwendungs- und Recyclingmaßnahmen entscheidend ist.

Nachhaltiges Facility Management und Rückbau: Nach der Fertigstellung des Gebäudes unterstützt Madaster das Facility Management durch die Bereitstellung detaillierter Informationen über die verbauten Materialien und deren Lebenszyklus. Beim Rückbau ermöglicht die Plattform eine zielgerichtete Demontage und die Wiederverwendung oder das Recycling der Materialien, was die Grundlage für einen geschlossenen Materialkreislauf bildet.

Die Anwendung von Madaster reicht somit über den eigentlichen Bau hinaus und erstreckt sich auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Die digitale Dokumentation und das Management der Materialdaten erleichtern nicht nur die Planung und Durchführung von Sanierungs- oder Umbaumaßnahmen, sondern fördern auch eine nachhaltige Stadtentwicklung.

Die Kooperation mit verschiedenen Akteuren aus der Bau- und Immobilienbranche, darunter Architekten, Ingenieure, Bauunternehmen und Materiallieferanten, ist für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft essenziell. Madaster startet so zum Beispiel in neuen Ländern mit einem Kennedy-Netzwerk aus 33 Akteuren, die als Vorreiter zusammen mit Madaster sich der Förderung der Kreislaufwirtschaft verschrieben haben. Diese partnerschaftliche Zusammenarbeit trägt dazu bei, den erfolgreichen Start von Madaster in neuen Ländern zu stützen und den Wandel hin zu einem nachhaltigen Bausektor zu beschleunigen und die Vision einer Welt ohne Bauabfall Realität werden zu lassen.

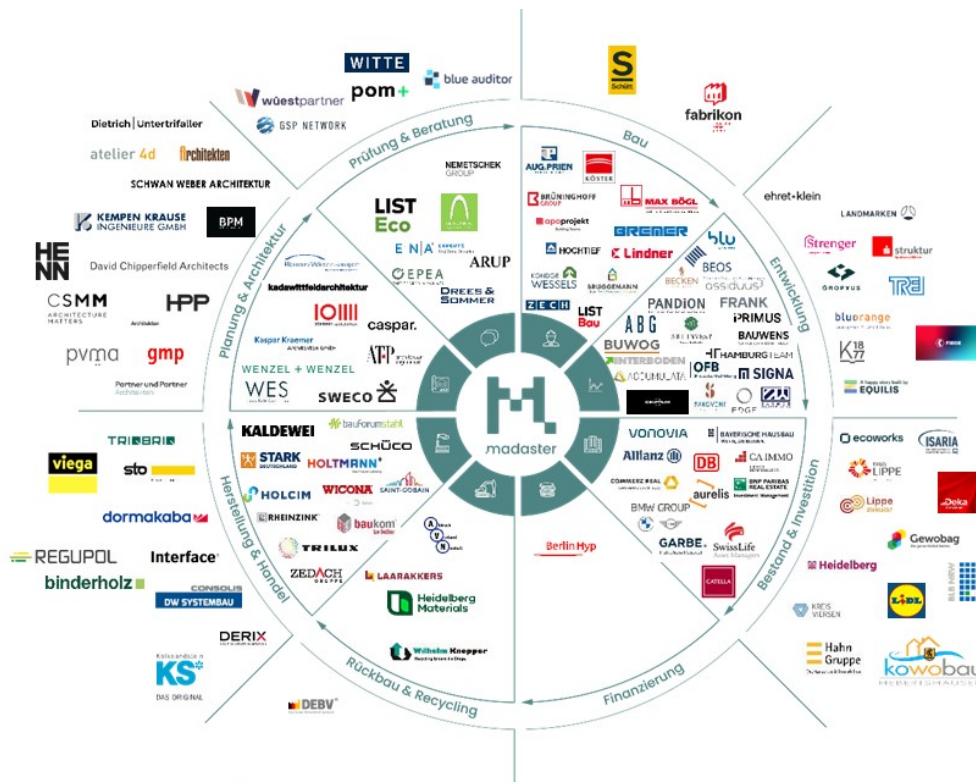


Abb. 2: Madaster Partnernetzwerk, Stand Januar 2024

Madaster repräsentiert somit nicht nur eine technologische Lösung für die Herausforderungen der Bauindustrie, sondern steht auch für einen kulturellen Wandel hin zu mehr Nachhaltigkeit und Verantwortung im Umgang mit unseren Ressourcen. Durch die Bereitstellung eines zentralen Registers für Gebäudematerialien und -komponenten ebnet Madaster den Weg für innovative Bauprozesse und unterstützt aktiv die Transformation der Branche in Richtung einer grüneren und effizienteren Zukunft.

4. Digitalisierung: Zirkuläres Bauen und BIM – Best Practice der Bauteilwiederverwendung im Holzbau [7]

Digitalisierung und automatisierter Datenaustausch erscheinen vielfach noch als große Herausforderung, obwohl bereits viele relevante Daten vorhanden sind, die aktuell sowie langfristig einen Mehrwert bieten. Diese müssen nun breitflächig nutzbar gemacht werden, damit sinnvolle Strukturen für eine Kreislaufwirtschaft geschaffen werden können.

4.1 Die Nutzung, Sicherung und Verwendung von Daten allgemein

Gebäuderessourcenpässe bieten mehr Informationen als nur die Erfassung der Massen verbauter Materialien und Produkte in Immobilien. Durch gezieltes Auslesen von BIM-Modellen können Objekte, je nach Modellierungstiefe, bis auf Produktkomponentenebene erfasst und analysiert werden.

Neben der Materialitätsanalyse liegt der Fokus vor allem auf der Auswertung der damit einhergehenden Umweltdaten der verwendeten Produkte sowie den Informationen zur Zirkularität. Diese betreffen einerseits den Anteil der genutzten (zertifizierten) Primär- und Sekundärrohstoffe, andererseits die jeweiligen Elementverbindungen und die daraus resultierende Demontierbarkeit. Mit der Bereitstellung ihrer Produktdaten bilden Produzenten die Grundlage der Berechnungen.

4.2 Der langfristige Mehrwert

Nicht nur als Nachweis für die Einhaltung bevorstehender Recyclinganteilsquoten oder ökologischer Maximalwerte, digitale Gebäuderessourcenpässe dauerhaft und zentral im Materialkataster Madaster gespeichert, profitieren langfristig über die einmalige Berechnung hinaus. Erfasste Verknüpfungen von Objektelementen mit konkreten Produktdatensätzen können zukünftig auch hinsichtlich weiterer Aspekte, wie beispielsweise der Materialgesundheit, automatisiert analysiert werden. Denn Neuberechnungen aufgrund aktualisierter oder erweiterter Produktinformation sind jederzeit per Knopfdruck möglich und folglich auch die Prüfung, ob ein Objekt insgesamt oder einzelne Bauteile noch den geforderten Standards entsprechen.

Produzenten wiederum können im Materialkataster stetig nachverfolgen, wo welches ihrer Produkte wann verbaut wurde. Diese Daten sind vielseitig interessant. Im Falle einer Rücknahmeverpflichtung schafft diese Information langfristige Planungssicherheit. Ist das Bauteil noch nicht am Ende seines Produktlebenszyklus angelangt, kann es erneut eingesetzt und die Daten an Marktplätze oder ein anderes Gebäude übertragen werden. Aber auch hinsichtlich der Erschließung von lokalen Quellen für Sekundärrohstoffe, ist die Produktverfolgung relevant. Ohne konkrete Informationen lassen sich nur schwer effiziente Strukturen für eine Kreislaufwirtschaft aufbauen.

4.3 Anforderungen an die BIM-Modelle

Dem Nutzen gegenüber sind die Mindestanforderungen an BIM-Modelle als Grundlage aller Auswertungen überschaubar. Benötigt werden die sogenannten Basismengen der Elemente bzw. Komponenten, wie Volumen, Flächen, Längen und/oder Stückzahl. Außerdem die jeweilige Materialbezeichnung oder alternativ eine Produkt-ID gemäß der Herstellerdatenbank. Und schließlich die Details zur Demontierbarkeit, wie Art bzw. Mittel der Verbindung und Überschneidungen von Komponenten.

4.4 Nutzung von Holzbaudaten für eine Wiederverwendung in der Praxis

4.4.1 Der digitale Zwilling im Holzbau

Die Planungstiefe im Holzbau ist systembedingt bereits seit mehreren Jahrzehnten deutlich detaillierter als in konventionellen Bauweisen.

Der Prozess der Vorfertigung im Holzbau benötigt qualitativ hochwertige Daten. Daten in Form einer digitalen Nachbildung (design-as-built) der zu produzierenden Bauteile. Die Bearbeitung mit CNC-Maschinen basieren auf Schnittstellen zur CAD-Software und den dort hinterlegten Attributen und Informationen.

4.4.2 Kreislaufwirtschaft als Ausgangspunkt für Datennutzung

Nach der Einführung einer Allgemeinen Rücknahmeverpflichtung durch die DERIX-Gruppe stellt sich die Frage nach der Verfügbarkeit von Daten – über mehrere Jahrzehnte hinaus.

Vollständige Daten über gebrauchte Holzelemente sind unter anderem neben der Vermeidung von Verbundkonstruktionen, neben dem notwendigen Vorlauf von 12 Monaten eine weitere elementare Voraussetzung für die Rücknahme von Bauteilen. Mit der Speicherung der Daten in einem digitalen Gebäuderessourcenpass und der Verknüpfung mit dem Materialkataster ergeben sich neue große Möglichkeiten für den zirkulären Holzbau.

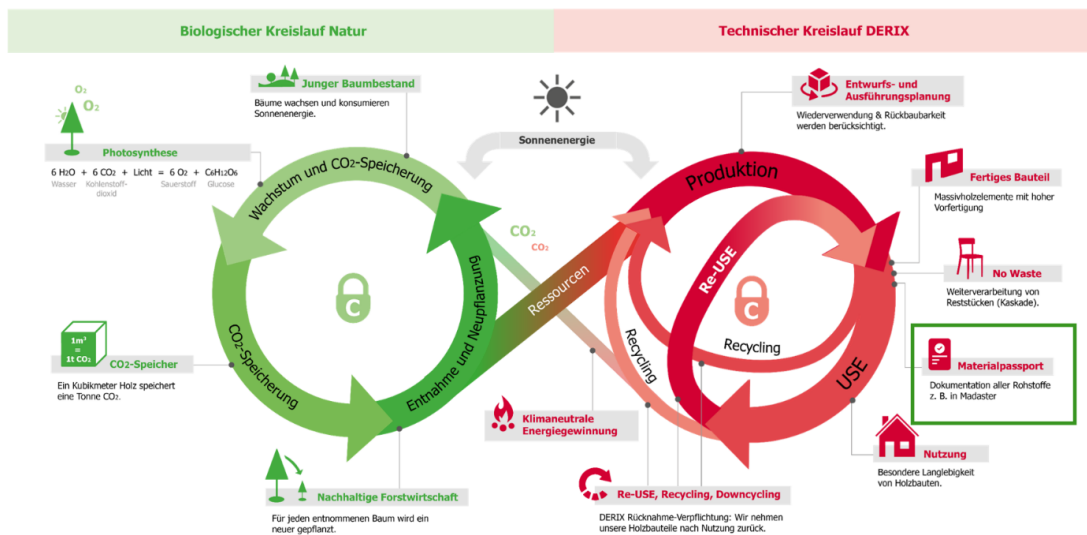


Abb. 3: Unendlichkeitskreislauf mit DERIX Rücknahmeverpflichtung (markiert: Materialpass)

4.4.3 Schnittstelle CAD - madaster

Bislang blieben die detaillierten Informationen aus den Produktionsdaten (der digitale Zwilling) nach Abschluss der Bauteilproduktion weitestgehend ungenutzt. Mit der Einführung von digitalen Gebäuderessourcenpässen ändern sich die Rahmenbedingungen für Datenverfügbarkeit jedoch grundlegend zum Positiven.

DERIX und madaster haben hier gemeinsam eine Schnittstelle zum Planungsprogramm CADWORK, das von der DERIX-Gruppe in der Konstruktion genutzt wird, programmiert. Mit wenigen Klicks in der Attributisierung der Bauteilinformationen werden sämtliche Bauteile mit ihren Informationen bzw. Attributen in die Plattform madaster eingelesen.

Die DERIX-Gruppe kooperiert mit madaster, um die Kreislaufwirtschaft in der Bau- und Immobilienbranche zu fördern und den ersten Schritt (Anlegen des Projektes mit sämtlichen Holzbau-Daten) für den Bauherrn bereits mit Abnahme zu liefern. Künftig kann das Ingenieurholzbau-Unternehmen DERIX der Plattform so auf Wunsch des Eigentümers sämtliche digitale Tragwerksdaten aus den eigenen Holzbauprojekten zur Verfügung stellen und so effektiv zur zirkulären Verwendung der Baustoffe beitragen.

Auf der Cloud-Plattform sind die Bestandteile des Holzbaus damit dokumentiert, sodass die Bauteile und Materialien bei einem späteren Rückbau effizient wiederverwendet werden können. Die hier dokumentierten Rohstoffe können dann beim Rückbau der Immobilie über Rohstoffbörsen zum Verkauf angeboten und für den Bau neuer Holzbauten genutzt werden. Ziel ist die Etablierung einer erfolgreichen Kreislaufwirtschaft: Nur wer weiß, was in einem Gebäude steckt, kann es als „Materiallager“ nutzen.

5. Nachhaltiges Bauen und Wirtschaftlichkeit [8]

5.1 Kosten und Nutzen nachhaltiger Bauweisen

In der aktuellen Bauwirtschaft stellen Ressourcenknappheit, steigende Rohstoffpreise und der Druck, Nachhaltigkeitsanforderungen zu erfüllen, erhebliche Herausforderungen dar. Doch nachhaltiges Bauen bietet nicht nur ökologische Vorteile, sondern erweist sich zunehmend als wirtschaftlich rentabel. Der Trend zum nachhaltigen Bauen, insbesondere unter Berücksichtigung des Cradle-to-Cradle-Prinzips, zielt darauf ab, Materialien so einzusetzen, dass sie am Ende des Lebenszyklus einer Immobilie wiederverwendet werden können. Diese Herangehensweise trägt nicht nur zur Schonung natürlicher Ressourcen bei, sondern ermöglicht auch signifikante Einsparungen durch reduzierte Energiekosten und geringere CO₂-Emissionen.

Zirkulär gebaute Immobilien erzielen höhere Verkaufs- und Vermietungspreise als konventionell errichtete Gebäude und werden bereits von einigen Banken für die Zinsgestaltung bei Darlehen berücksichtigt. Diese Entwicklung deutet darauf hin, dass zirkuläre Bauweisen nicht nur für die Umwelt, sondern auch für die finanzielle Bilanz von Vorteil sind. Unternehmen, die sich dieser Bauweise widmen, können somit ihre Marktposition stärken und sich Wettbewerbsvorteile sichern.

5.2 Fallbeispiel: Kreisarchiv Viersen

Das Kreisarchiv Viersen in Nordrhein-Westfalen, fertiggestellt 2022, demonstriert eindrucksvoll die Vorteile zirkulären Bauens. Trotz initial geschätzter Kosten von 8,9 Millionen Euro im Jahr 2016 und einer späteren Kostensteigerung auf 15,9 Millionen Euro, bedingt durch Preissteigerungen für Baumaterialien und einem erhöhten Flächenbedarf, überzeugt das Projekt durch seine ökologischen und ökonomischen Vorzüge. Durch die Wiederverwendung von Abbruchziegeln, den Einsatz von Holz- und Betonbauteilen mit Schraubverbindungen für eine rückstandslose Demontage, und den Einsatz erneuerbarer Energiequellen wie Sonnenkollektoren und Wärmepumpen, setzt der Kreis Viersen neue Maßstäbe. Zusätzlich geplant sind eine Förderschule und ein Straßenverkehrsamt, die ebenfalls nach den Prinzipien der zirkulären Wirtschaft erbaut werden sollen.

Obwohl die Baukosten zunächst hoch erscheinen, wird der finanzielle Aufwand relativiert, wenn man die Lebenszykluskosten betrachtet. Madaster prognostiziert für das Kreisarchiv einen Material-Restwert von etwa 1,2 Millionen Euro. Darüber hinaus werden Einsparungen von 3,4 Millionen Euro für Energie, 2,3 Millionen Euro für Instandhaltung und 140.000 Euro durch die CO₂-Steuer erwartet, was die Gesamtkosten auf unter die ursprünglichen Schätzungen senkt.

Die Regierung Nordrhein-Westfalens hat zudem einen Erlass veröffentlicht, der es ermöglicht, kreislauffähige Gebäude bilanziell auf einen Restwert abzuschreiben. Dieser Ansatz ermöglicht eine dauerhafte Vermögensbilanzierung und führt zu geringeren jährlichen Abschreibungen, wodurch kommunale Haushalte entlastet werden.

Die Umsetzung einer echten Kreislaufwirtschaft setzt Transparenz und detaillierte Umweltdaten voraus. Madaster bietet eine Plattform, die es ermöglicht, Materialwerte direkt mit den internationalen Rohstoffbörsen zu verknüpfen, um so den tagesaktuellen Wert einer Immobilie zu bestimmen. Durch die Registrierung jedes verbauten Materials und Bauteils wird eine umfassende Dokumentation geschaffen, die die Grundlage für zukünftige nachhaltige Bauanforderungen bildet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass zirkuläres Bauen nicht nur ökologische Vorteile bietet, sondern sich auch ökonomisch auszahlt. Die Integration des Restwerts in die Bilanzierung und die Senkung der Betriebskosten über die Lebensdauer eines Gebäudes hinaus unterstreichen

die finanzielle Sinnhaftigkeit dieser Bauweise. Mit steigenden Anforderungen an Nachhaltigkeit und Klimaschutz wird der Wert nachhaltig gebauter Immobilien weiter zunehmen, was zirkuläres Bauen zu einer attraktiven Option für die Zukunft macht.

6. Herausforderungen und Lösungsansätze

6.1 Rechtliche und technische Barrieren

Das nachhaltige und zirkuläre Bauen steht vor zahlreichen rechtlichen und technischen Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Rechtliche Barrieren entstehen oft durch veraltete Bauvorschriften und Zertifizierungsprozesse, die innovative Baupraktiken und die Verwendung recycelter oder nachwachsender Materialien nicht ausreichend unterstützen. Technische Hindernisse beziehen sich häufig auf die mangelnde Verfügbarkeit oder Kompatibilität von Baustoffen und Systemen, die eine zirkuläre Nutzung ermöglichen.

Die Förderung von Innovationen im Bauwesen und die Entwicklung neuer Technologien und Materialien sind entscheidend, um diese Barrieren zu überwinden. Durch Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen, Industrie und Regierungsbehörden können innovative Lösungen entwickelt und in die Praxis umgesetzt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Einführung digitaler Tools wie Building Information Modeling (BIM), die eine genauere Planung, Dokumentation und Verwaltung von Gebäudematerialien über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglichen.

6.2 Förderung von Innovationen und Kooperationen

Die Förderung von Innovationen und Kooperationen ist entscheidend, um die nachhaltige und zirkuläre Bauwirtschaft voranzutreiben. Dies umfasst die Entwicklung neuer Materialien und Technologien, die Verbesserung bestehender Bauprozesse und die Schaffung von Anreizen für die Umsetzung nachhaltiger Praktiken. Ein Schlüsselement ist die enge Zusammenarbeit zwischen allen Stakeholdern der Baubranche, einschließlich Architekten, Ingenieuren, Bauunternehmern, Materiallieferanten und der öffentlichen Hand.

Ein Ansatz zur Überwindung technischer Barrieren ist die Investition in Forschung und Entwicklung (F&E) zur Optimierung von Recyclingverfahren und der Herstellung biobasierter Baustoffe. Zudem spielen Innovationspartnerschaften, wie sie durch Plattformen wie Madaster gefördert werden, eine wesentliche Rolle, indem sie einen Rahmen für den Austausch von Wissen und Ressourcen bieten und die Entwicklung neuer, zirkulärer Lösungen beschleunigen.

7. Zukunftsausblick

7.1 Entwicklungstrends im nachhaltigen und zirkulären Bauen

Die Zukunft des Bauwesens wird zunehmend durch Trends wie Digitalisierung, Modularisierung und die Nutzung erneuerbarer Ressourcen geprägt. Nachhaltiges und zirkuläres Bauen gewinnt an Bedeutung, da die Branche nach Wegen sucht, den CO₂-Fußabdruck zu reduzieren und Ressourceneffizienz zu maximieren. Ein wesentlicher Trend ist die zunehmende Nutzung von BIM und anderen digitalen Werkzeugen, die eine präzisere Planung, Ausführung und das Recycling von Bauteilen ermöglichen.

Darüber hinaus gewinnen Ansätze wie Design for Disassembly (DfD) an Bedeutung, die bereits in der Planungsphase die spätere Demontage und Wiederverwendung von Bauteilen berücksichtigen. Diese Entwicklungen führen zu innovativen Bauprojekten, die nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile bieten und somit die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen steigern.

7.2 Rolle der digitalen Technologien und Plattformen

Digitale Technologien und Plattformen spielen eine entscheidende Rolle in der Transformation der Bauindustrie hin zu mehr Nachhaltigkeit und Zirkularität. Sie ermöglichen eine effizientere Ressourcennutzung, verbessern die Transparenz über den gesamten Lebenszyklus von Bauprodukten und erleichtern die Implementierung zirkulärer Baupraktiken.

Plattformen wie Madaster fungieren als zentrale Anlaufstellen für die Dokumentation, Verwaltung und Bewertung von Materialien und Gebäuden, unterstützen die Zertifizierung nachhaltiger Gebäude und fördern den Austausch und die Wiederverwendung von Bauteilen. In Kombination mit BIM und anderen digitalen Werkzeugen ermöglichen sie eine detaillierte Planung und Umsetzung zirkulärer Bauvorhaben, die den Weg für eine nachhaltige Zukunft der Baubranche ebnen.

8. Schlussfolgerungen

8.1 Zusammenfassung der Kernpunkte

Die umfassende Betrachtung der vorgestellten Themenbereiche – von der Vorstellung innovativer Plattformen wie Madaster über die Herausforderungen und Lösungsansätze im nachhaltigen und zirkulären Bauen bis hin zu Entwicklungstrends und der Rolle digitaler Technologien – verdeutlicht eine klare Richtung für die Zukunft der Bauindustrie. Es hat sich gezeigt, dass nachhaltiges Bauen nicht nur eine ökologische Notwendigkeit, sondern auch eine ökonomische Chance darstellt. Durch die Implementierung von Cradle-to-Cradle-Prinzipien und die Nutzung zirkulärer Wertschöpfungsketten können Ressourcen effizient genutzt, Abfälle reduziert und CO₂-Emissionen verringert werden. Digitale Technologien wie BIM und Plattformen für das Materialkataster spielen eine entscheidende Rolle bei der Erreichung dieser Ziele, indem sie Transparenz schaffen, die Planung und Dokumentation verbessern und die Wiederverwendung von Materialien erleichtern.

Trotz dieser positiven Entwicklungen stehen Akteure in der Bauindustrie vor rechtlichen, technischen und kulturellen Barrieren, die innovative Ansätze bremsen können. Die Notwendigkeit, diese Herausforderungen durch Forschung, Innovation und Kooperation zu überwinden, ist offensichtlich. Das Beispiel des Kreisarchivs Viersen zeigt exemplarisch, wie zirkuläres Bauen realisiert und ökonomisch rentabel gestaltet werden kann, wobei der Schlüssel zum Erfolg in der frühzeitigen Integration nachhaltiger Prinzipien in den gesamten Planungs- und Bauprozess liegt.

8.2 Handlungsempfehlungen für die Bauindustrie

Förderung der Digitalisierung: Unternehmen sollten die Digitalisierung in allen Bereichen vorantreiben, um Planungsprozesse zu optimieren und eine durchgängige Dokumentation von Materialien und Gebäuden zu gewährleisten. Investitionen in BIM und ähnliche Technologien zahlen sich durch verbesserte Effizienz und Transparenz aus.

Ausbau der Zusammenarbeit: Die Branche muss stärker zusammenarbeiten, um gemeinsame Standards für zirkuläres Bauen zu entwickeln und umzusetzen. Dazu gehören Partnerschaften zwischen Herstellern, Bauunternehmen, Planern und öffentlichen Institutionen sowie der Austausch von Best Practices.

Investition in Bildung und Training: Die Vermittlung von Wissen über nachhaltige Baupraktiken und die Bedeutung der Kreislaufwirtschaft sollte integraler Bestandteil der Ausbildung von Fachkräften sein. Weiterbildungsangebote für bestehende Mitarbeiter sind ebenso wichtig, um die Transformation der Industrie zu unterstützen.

Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen: Politik und Normungsorganisationen sind gefordert, rechtliche und regulative Hindernisse für zirkuläres Bauen abzubauen und Anreize für nachhaltige Investitionen zu schaffen.

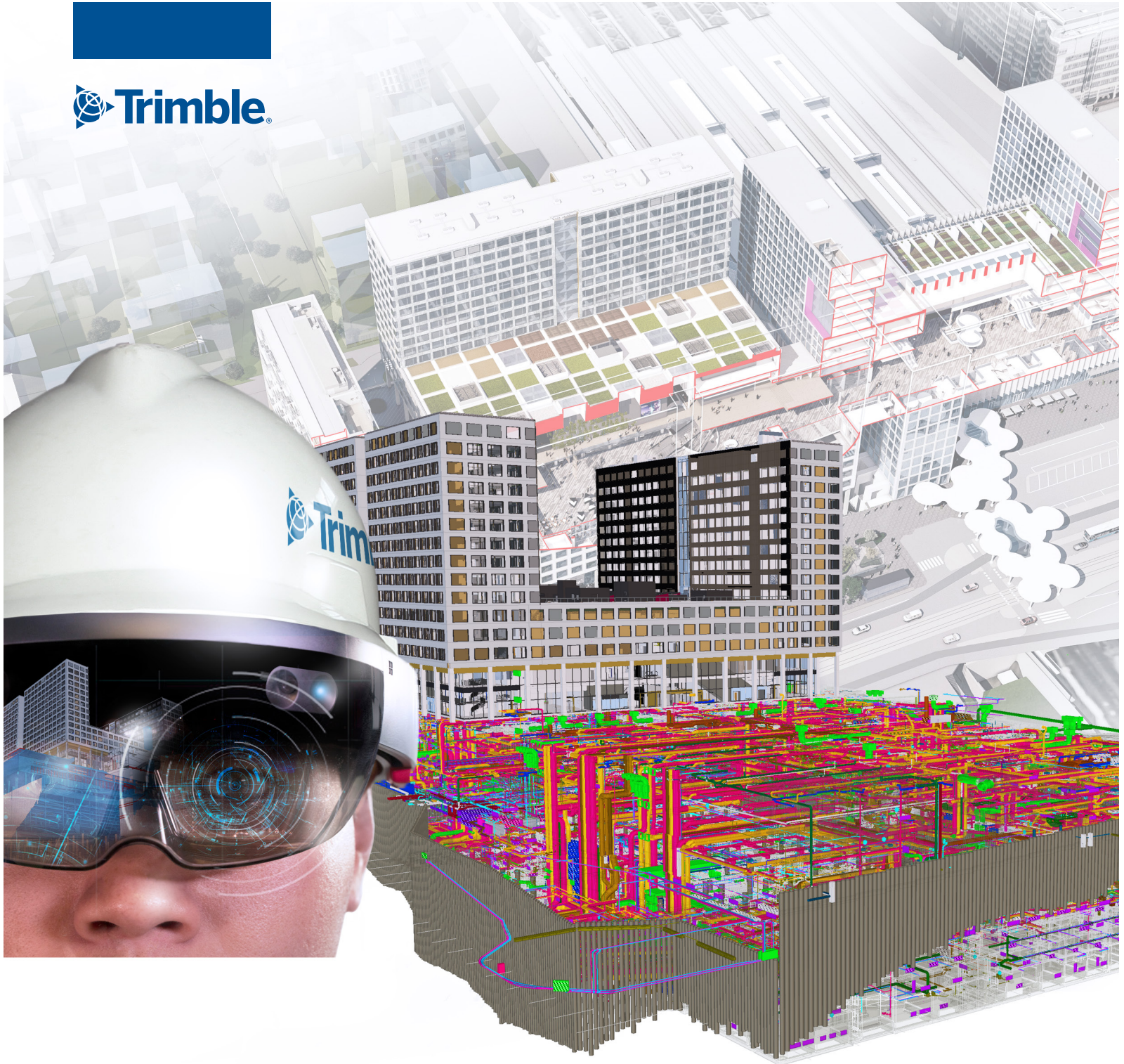
Innovation und Forschung: Die Förderung von F&E im Bereich nachhaltiger Baustoffe und Technologien ist essenziell, um praktikable Lösungen für die Herausforderungen des zirkulären Bauens zu entwickeln.

Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in die Unternehmensstrategie: Nachhaltigkeit sollte nicht als Zusatzleistung betrachtet werden, sondern als zentraler Bestandteil der Unternehmensphilosophie und -strategie.

Durch die Umsetzung dieser Handlungsempfehlungen kann die Bauindustrie einen signifikanten Beitrag zum Umweltschutz leisten, ihre Resilienz gegenüber Ressourcenknappheit und Preisvolatilität erhöhen und gleichzeitig neue Geschäftsmöglichkeiten erschließen. Die Zukunft des Bauens ist zirkulär, und der Weg dorthin erfordert Engagement, Innovation und Kooperation aller Beteiligten.

Referenzen

1. Braungart, M./McDonough, W. und EPEA GmbH, Das Cradle to Cradle Designprinzip. Entwickelt. Verfügbar unter: www.epea.com [Zugriff am 28.02.2024].
2. Zeit Online, 2018. Weltbank rechnet für das Jahr 2015 mit 3,4 Milliarden Tonnen Müll. [online] Verfügbar unter: www.zeit.de/wissen/umwelt/2018-09/umweltverschmutzung-weltbank-muell-zunahme-milliarden-tonnen-plastik#:~:text=Die%20Menge%20an%20M%C3%BCll%2C%20die,Milliarden%20Tonnen%20pro%20Jahr%20steigen [Zugriff am 28.02.2024].
3. Umwelt Bundesamt, 2022. Abfallaufkommen. [online] Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall> [Zugriff am 28.02.2024].
4. EPEA, 2023. Cradle-to-cradle. [online] Verfügbar unter: <https://epea.com/ueber-uns/cradle-to-cradle> [Zugriff am 28.02.2024].
5. Kraaijvanger Architecten, 2023. Municipal Office Venlo. [online] Verfügbar unter: <https://www.kraaijvanger.nl/en/projects/city-hall-venlo/> [Zugriff am 28.02.2024].
6. Wille, J., 2019. Ein Haus wie ein Baum. [online] Verfügbar unter: <https://www.fr.de/wirtschaft/haus-baum-11072839.html> [Zugriff am 28.02.2024].
7. Bahlo, K. und Stepler, M., 2023. Bauteilwiederverwendung im Holzbau. In: 16. Europäischer Kongress „Effizientes Bauen mit Holz“. Köln: FORUM HOLZBAU.
8. Bergmann, P., 2023. Nachhaltiges Bauen: Ein Trend, der sich auch monetär lohnt. Immobilien Finanzierung. Helmut Richardi, Juni 2023.



Tekla-Software

von Trimble für die Bauindustrie

Exakte Modellinformationen sind für einen erfolgreichen konstruktiven Workflow unentbehrlich: verlässlich, stets verfügbar und in der benötigten Detailtiefe. Tekla-Software ermöglicht eine ausführungsbereite Planung, reduziert Nachträge und liefert aussagekräftige Daten für die Fertigung und Montage. Für besseres Bauen.

WWW.TEKLA.COM/DE



100 Jahre zusätzliche Lebensdauer für die Nibelungenbrücke Worms! Wie kann das gelingen?

Prof. Dr.-Ing Steffen Marx
Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau
steffen.marx1@tu-dresden.de

Dieser Beitrag wurde bereits in der Zeitschrift Bautechnik mit dem Titel "Die Nibelungenbrücke als Pilotprojekt der digital unterstützten Bauwerkserhaltung" unter folgender Autorenschaft veröffentlicht:

Kang, C.; Voigt, C.; Eisermann, C.; Kerkeni, N.; Hegger, J.; Hermann, W.; Jackmuth, A.; Marzahn, G.; Marx, S. (2024) Die Nibelungenbrücke als Pilotprojekt der digital unterstützten Bauwerkserhaltung. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202300089>

1. Einleitung

Das Bauwesen zählt zu den Hauptkonsumenten natürlicher Ressourcen, weshalb hier Einsparungen besonders effektiv wären. Da 54 % des jährlichen Abfallaufkommens in Deutschland [1] auf Bau- und Abbruchabfälle zurückzuführen sind, kann insbesondere durch den Erhalt des Bauwerksbestandes ein wesentlicher Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz geleistet werden. Der Zustand eines Bauwerks ist – ähnlich dem von Menschen – mit fortschreitendem Lebensalter von einer immer schneller ablaufenden Degradation geprägt. Vorbeugende Maßnahmen gegen Alterung sind umso erfolgreicher, je eher sie ergriffen werden. Um die Nutzbarkeit komplexer Bauwerke zu verlängern, sind deutlich mehr Informationen zu einem viel früheren Zeitpunkt erforderlich als heute üblich. Um dieses Defizit drastisch zu verringern und zu einer prädiktiven Instandhaltung [2] zu gelangen, bedarf es grundlegender Forschung zu den Methoden der Erfassung, Verknüpfung und Bewertung aller Daten, die Aussagen zum Zustand des Bauwerks zulassen. Die Digitalisierung, insbesondere das Konzept des Digitalen Zwillings [3–5], erlangt in diesem Kontext eine völlig neue Bedeutung. Sie ermöglicht die Kombination und Echtzeitauswertung sämtlicher für Betrieb und Instandhaltung erforderlicher Daten. Das Bauwesen steht hier jedoch vor besonderen inhaltlichen und methodischen Herausforderungen: Bauwerke, v. a. der Verkehrsinfrastruktur, sind immer Unikate. Sie sind geprägt durch enorme Dimensionen und haben eine erheblich höhere Lebensdauer als andere technische Anlagen. Ihre Änderungsrate infolge Degradation ist sehr gering und somit kaum messbar. Diese Herausforderungen werden behandelt und die in Rahmen des DFG Schwerpunktprogrammes SPP 2388 „Hundert plus“ (kurz: SPP 100+, siehe Abschnitt 4) entwickelten Methoden am Pilotprojekt Nibelungenbrücke Worms validiert.

2. Die Nibelungenbrücke Worms

Die von Ulrich Finsterwalder geplante und 1953 im Freivorbau [6, 7] errichtete Nibelungenbrücke ist zweifellos ein Bauwerk von besonderer Bedeutung [8]. Sie ist nicht nur die erste Spannbetonbrücke über den Rhein, sondern auch eines der ersten Exemplare einer neuen, innovativen Bauweise, des Freivorbaus, die das Bauen von Spannbetonbrücken weltweit revolutioniert hat. Darüber hinaus spiegelt sie den Stand der Technik und das Verständnis der Ingenieure für den Entwurf und die Konstruktion von Großbrücken in den 1950er Jahren wider. Die Nibelungenbrücke ist seit 2007 bzw. 2008 in Rheinland-Pfalz und Hessen als Kulturdenkmal erfasst [9]. Darüber hinaus wurde die Nibelungenbrücke am 1. September 2022 von der Bundesingenieurkammer als „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“

ausgezeichnet. Die baukulturelle Bedeutung wird im Begleitband zur Auszeichnung [8] von Prof. Dicleli eingehender gewürdigt.

Die Nibelungenbrücke ist Teil der Bundesstraße B 47 zwischen den Ortschaften Worms und Bürstadt. Die Bundesstraße verläuft im Bauwerksbereich auf zwei getrennten Fahrbahnen mit jeweils zwei Fahrspuren (Abb. 1). Während die Fahrbahn in westlicher Fahrtrichtung auf der historischen Strombrücke (Nibelungenbrücke) geführt wird, liegt die Fahrbahn in östlicher Richtung auf der 2008 fertig gestellten neuen Rheinquerung (2. Rheinquerung). Der Straßenquerschnitt ist mit einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) von rund 22 000 Fahrzeugen pro Tag belastet, wobei der Anteil des Schwerverkehrs 10 % beträgt.



Abb. 1: Gesamtansicht der Nibelungenbrücke (in Richtung)

Die gesamte Nibelungenbrücke besitzt eine Länge von ungefähr 745 m und besteht aus drei konstruktiv entkoppelten Teilbauwerken, der rheinland-pfälzischen Vorlandbrücke, der Strombrücke sowie der hessischen Vorlandbrücke. Die Vorlandbrücken sind nicht Gegenstand der nachfolgenden Ausführungen.



Abb. 2: Ansicht der Nibelungenbrücke (in Richtung Unterstrom)

Die 335 m lange Strombrücke wurde auf den Caissongründungen der Vorgängerbrücke erbaut, woraus die ungleichmäßigen Spannweiten von 101,63 m, 114,23 m und 104,25 m resultieren. Der Überbau der Hauptspannweiten setzt sich jeweils aus zwei Kragträgern zusammen, die von den Pfeilern aus im Freivorbau errichtet wurden. Im Endzustand sind die Kragträger in Feldmitte über vertikal vorgespannte Gerbergelenke miteinander gekoppelt (Abb.3). Während auf der rheinland-pfälzischen Seite ein 23,22 m kurzes Endfeld als Gegengewicht für den Überbau der linkrheinischen Seitenöffnung dient, wurde im Bereich des hessischen Widerlagers aufgrund des

Platzmangels und der besonderen Auflagersituation des letzten Korbbogens der Vorlandbrücke eine komplexere Konstruktion erforderlich. Diese hängt das Kragmoment mithilfe von vertikalen, im Widerlagerfundament verankerten Spanngliedern zurück.

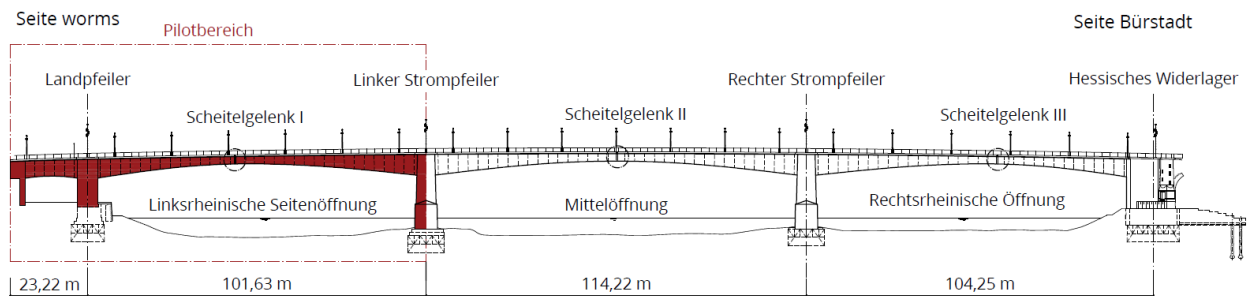


Abb. 3: Längsschnitt der Strombrücke (in Richtung Unterstrom)

Der Überbau besteht aus zwei Hohlkästen, die über eine Fahrbahnplatte und Querträger miteinander verbunden sind. Die Konstruktionshöhe der gevouteten, 2 m breiten Hohlkästen variiert zwischen 6,50 m in der Einspannstelle der Strompfeiler und 2,5 m in den Scheitelgelenken (Abb.4). Der Überbau wurde in Längs- und Querrichtung mit Einzelspanngliedern Typ D&W, $\varnothing 26$ mm der Stahlgüte St 60/90 im nachträglichen Verbund beschränkt vorgespannt. Die Längsspannglieder verlaufen zur Aufnahme der negativen Biegemomente im Wesentlichen in der Fahrbahnplatte. Lediglich am Ende der Vorbauabschnitte wurden einzelne Spannglieder zur Verankerung in die Stege gezogen. Zusätzlich zur Längs- und Quervorspannung wurden alle Stege der beiden Hohlkastenträger in jedem der 3 m langen Vorbauabschnitte mit vertikalen Spannstäben als vorgespannte Schubnadeln versehen.

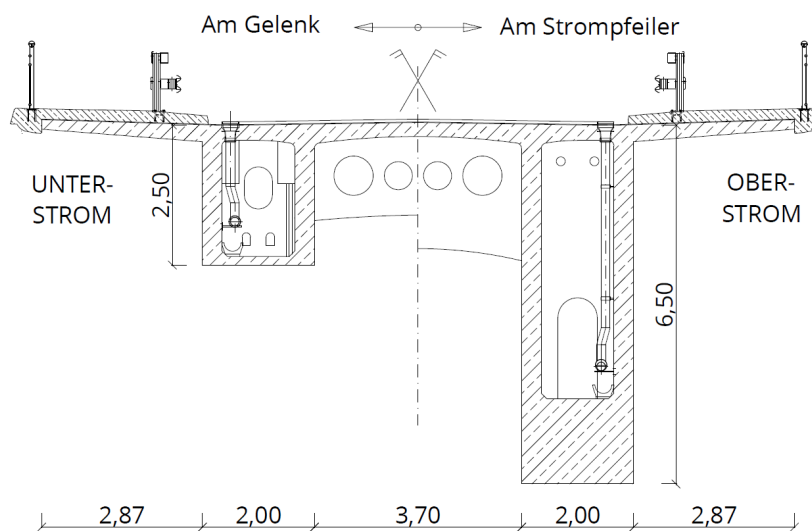


Abb. 4: Brückenquerschnitt

3. Instandhaltung der Nibelungenbrücke

3.1 Instandhaltungshistorie

Aufgrund der fortgeschrittenen Nutzungsdauer wurde die Nibelungenbrücke in der Vergangenheit bereits mehrfach instandgesetzt. 1968 erfolgt der Austausch der Übergangskonstruktionen. Im Jahr 1974 wurde auf der Fahrbahnplatte erstmals eine Abdichtung ergänzt, die bis dato vollständig fehlte.

In Rahmen der regelmäßigen Bauwerksprüfungen Anfang der 2000er Jahre wurden Schäden an den Übergangskonstruktionen und den nicht vorhandenen bzw. defekten Abdichtungssystemen sowie teilweise gebrochene Spannglieder im Bereich der Scheitelgelenke festgestellt. Daraufhin wurde eine vollumfängliche Zustandsaufnahme und Nachrechnung des Bauwerks initiiert [10]. Die 2005 durchgeführte Nachrechnung ergab Defizite hinsichtlich der Biegebruch- sowie Schubtragfähigkeit des Überbaus. Zudem wurde nachgewiesen, dass die vertikalen Spannglieder der Scheitelgelenke und Zugbänder des hessischen Widerlagers keine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Neben den standsicherheitsrelevanten Defiziten wies die Nibelungenbrücke eine Vielzahl historischer, konstruktiver Schwachstellen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit auf:

- fehlende Abdichtungen auf der Fahrbahn (bis 1974)
- freie Entwässerung in den Hohlkästen in eine offene Entwässerungsrinne
- unzureichend verdämmte, einbetonierte Kühlleitungen in den Stegen und der Bodenplatte der Hohlkästen
- Defizite des Spannverfahrens (geringer Hüllrohrdurchmesser, Spanngliedkopplungen mit Übergangsstücken aus Holz (Abb. 5))

Um die Auswirkungen dieser Schwachstellen auf den Zustand der Spannglieder und schlaffen Bewehrung zu quantifizieren, wurden vor und während der grundhaften Instandsetzung 2010 verschiedene Bauwerksuntersuchungen durchgeführt. Dabei ergaben strichprobenartige Kontrollen für die Längsspannglieder einen durchschnittlichen Verpressfehler von 20 %. Bei den Spanngliederuntersuchungen an den Zugpfeilern des hessischen Widerlagers wurden sogar in 40 % der Fälle mangelhaft verpresste Hüllrohre festgestellt [10]. Untersuchungen des Konstruktionsbetons zeigten, dass alle Querschnittsteile eine hohe unzulässige Chloridbelastung aufwiesen. Im Bereich der Fahrbahnplatte betrug die Eindringtiefe der Chloride mit Überschreitungen des damaligen Grenzwertes von 0,025 M.-% Beton teilweise 6 bis 8 cm [11].

In den Jahren 2010 bis 2013 erfolgte der Einbau externer Spannglieder sowie der Ersatz der Spannstäbe in den Scheitelgelenken und Zugbändern. Von einer Verbesserung der Schubtragfähigkeit wurde aus Mangel an technischen und wirtschaftlichen Lösungen abgesehen und eine Restnutzungsdauer von 15 bis 20 Jahren festgelegt. Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit wurde der überwiegende Teil der Kühlleitungen und Verpressfehler an den internen Spanngliedern, während der grundhaften Instandsetzung 2010 - 2013 nachträglich verpresst. Zudem erfolgte – je nach Möglichkeit - ein Austausch des chloridbelasteten Konstruktionsbetons der Fahrbahnplatte [12]. Da der vollständige Austausch aus statisch-konstruktiven Gründen jedoch nicht möglich war, wurde die Chloridbelastung durch eine neue Abdichtung und ein aufgetragenen Oberflächenschutzsysteme planmäßig „eingefroren“.

3.2 Aktuelle Erhaltungsstrategie und Herausforderung

Die Instandsetzung der Nibelungenbrücke erfolgte 2010 unter der Maßgabe einer noch vorhandenen Restnutzungsdauer von 15 bis 20 Jahren. Die damalige Erhaltungsstrategie sah vor, die Brücke 2025 rückzubauen und 2028 durch einen Neubau zu ersetzen. Aufgrund der hohen baukulturellen Bedeutung der Nibelungenbrücke wurde diese Erhaltungsstrategie jüngst einer Revision unterzogen mit dem Ergebnis, die Brücke durch geeignete lebensdauererlängernde Maßnahmen über das Jahr 2025 hinaus nutzen zu können. Hierfür soll neben der üblichen Bauwerksprüfung verstärkt der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik inkl. Nutzung intelligenter Digitalisierungsmethoden zur Bestandsbewertung, Zustandsprognose herangezogen werden, um das Zuverlässigkeitsniveau der Brücke verschärft zu bewerten [12] und erforderliche Maßnahmen abzuleiten, die eine stand- und verkehrssichere Weiternutzung ermöglichen. Dabei sind nach derzeitigem Erkenntnisstand insbesondere zwei Herausforderungen zu bewältigen.

1) Herausforderung Querkrafttragfähigkeit

Die Querkraftbeanspruchung des Überbaus spielte beim Entwurf der Nibelungenbrücke eine wesentliche Rolle. Die Voutung und damit die Höhe der Hohlkastenträger wurde so konzeptioniert, dass die Zug- und Druckkräfte im Ober- und Untergurt von der Kragarmspitze bis zum Pfeileranschnitt linear zunehmen und die Schubbeanspruchung der Stege annähernd konstant ist [6]. Aufgrund fehlender normativer Vorgaben für Spannbetonbrücken erfolgte die Bemessung der Nibelungenbrücke damals nach dem seit 1950 vorliegenden 7. Entwurf der DIN 4227 (1953) [13]. Danach konnte auf Querkraftbewehrung verzichtet werden, solange die Hauptzugspannungen bei rechnerischen Bruchlasten den Grenzwert von 1,8 MPa nicht überschreiten [14]. Durch die mehraxiale Vorspannung des Überbaus konnte dieses Kriterium seinerzeit erfüllt werden. Da die Nachweisführung heutzutage nicht mehr auf dem Hauptspannungskriterium, sondern auf einem Fachwerkmodell mit variabler Druckstrebenneigung basiert, führt die fehlende Querkraftbewehrung nach den aktuellen Regelwerken zu einem rechnerischen Tragfähigkeitsdefizit. Bisher konnte in numerischen Untersuchungen die Querkrafttragfähigkeit sowohl in Stufe 1 als auch Stufe 2 der Nachrechnungsrichtlinie [15] nicht nachgewiesen werden. Das Bauwerk wurde deswegen zurückliegend für den erlaubnis- und genehmigungspflichtigen Schwerverkehr gesperrt. Zudem wurden regelmäßige Sonderprüfungen auf Schubrisse angeordnet. Bislang konnten jedoch keine Schubrisse am Bauwerk festgestellt werden.

(2) Herausforderung Bewehrungs- und Spanngliedkorrosion

Die bereits erwähnten konstruktiven Besonderheiten (fehlende Abdichtung, Kühlleitungen etc., siehe Abschnitt 3.1), die nach aktuellem Verständnis nicht dem Stand der Technik entsprechen, begünstigten über viele Jahre den Zutritt von Taumitteln bis ins Innere der Konstruktion und förderten die chloridinduzierte Korrosion an der Bewehrung und dem Spannstahl (Abb.5). Die im Rahmen der grundhaften Instandsetzung 2010-2013 durchgeführten Maßnahmen gegen das Fortschreiten der Korrosion erfolgten unter der Prämisse einer Restnutzungsdauer bis mindestens 2025. Für eine Nutzung des Bauwerks über 2025 hinaus wird nunmehr eine erneute Beurteilung der Trageigenschaften erforderlich.



Abb. 5: Korrosionserscheinung an einer Spanngliedkopplung mit Übergangsstücken aus Holz in 2010

4. Das Schwerpunktprogramm SPP 100+

Im Frühjahr 2021 wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) das Schwerpunktprogramm 2388 „Hundert plus – Verlängerung der Lebensdauer komplexer Baustrukturen durch intelligente Digitalisierung“ (kurz: SPP 100+) initiiert. Nach einem sorgfältigen und professionellen Begutachtungsverfahren wurden im Sommer 2022 ein Koordinationsprojekt und 19 Teilprojekte verschiedener deutscher akademischer Einrichtungen genehmigt. Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx vom Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden ist der Koordinator des Projektes. Übergeordnetes Ziel ist eine beispielhafte konzeptionelle und grundlegende Neuausrichtung der derzeitigen Instandhaltungsstrategie von Infrastrukturbauwerken. Das SPP 100+ umfasst drei interdisziplinäre Forschungsbereiche: Digitale Modelle, Digitale Verknüpfung und Zustandsindikatoren.

Der Bereich „Digitale Modelle“ entwickelt Methoden, um aus heterogenen Bestandsdaten von Ingenieurbauwerken, unterstützt durch digitale Messverfahren, weitgehend automatisiert georeferenzierte, objektorientierte 3D-Modelle zu erzeugen, die neben der Geometrie auch semantische Informationen enthalten. Schwerpunkt des Bereichs „Digitale Verknüpfung“ ist die Echtzeit-Aufbereitung der zeitvarianten Zustandsinformationen des realen Objektes und deren Verknüpfung mit dem Digitalen Zwilling. Der Bereich „Zustandsindikatoren“ entwickelt wissenschaftliche Methoden für die automatisierte Ableitung von Induktoren zur Bewertung des Bauwerkszustandes aus kontinuierlichen Messdaten und aus Daten der klassischen Instandhaltung und Inspektion.

Die in den verschiedenen Teilprojekten des SPP 100+ entwickelten Methoden werden an der Nibelungenbrücke Worms getestet und validiert, um als Multiplikator zu wirken und die geprüften Methoden letztendlich auf Ingenieurbauwerke allgemein übertragen zu können.

5. Die Nibelungenbrücke als Pilotprojekt

Um die intelligente, digital unterstützte Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken zu erforschen, hat das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) in Kooperation mit dem SPP 100+ die Nibelungenbrücke in Worms als prototypisches Pilotprojekt initiiert. Die Schwerpunkte dieses Projekts werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die geplanten Maßnahmen wie z. B. die +Modellierung, das SHM und der Digitale Zwilling, zunächst auf einen sogenannten Pilotbereich (siehe Abb.3), d. h. die Land- und die erste Stromspannweite der Brücke auf rheinland-pfälzischer Seite, angewendet werden. Eine räumliche Erweiterung auf das gesamte Bauwerk mit einer fachlichen Vertiefung um weitere Anwendungsfälle ist vorgesehen.

5.1 Geometrisch-semantische 3D-Modellierung

Basierend auf einer multimodalen Datenerfassung werden 3D-Modelle der Nibelungenbrücke erstellt, die einerseits den geplanten Zustand (as-designed Model) und den gebauten Zustand (as-built Model) des Bauwerks repräsentieren. Die Modelle werden den einzelnen Teilprojekten des SPP 100+ als Test-Datengrundlage in verschiedenen Verarbeitungsstufen zur Verfügung gestellt: Rohdaten (z. B. Punktwolken und Fotos), Teilmodellen, unvollständigen BIM-Modellen und Fehlerdaten.

Das as-designed Model wird anhand der Bestandsunterlagen erstellt, siehe Abb. 6(a). Zu diesem Zweck werden alle vorhandenen Bestandsunterlagen, z. B. 2D-Pläne, Inspektionsberichte sowie die Prüfberichte der Bauwerksdiagnostik, zusammengestellt, ausgewertet und strukturiert. Durch die konsequente Digitalisierung der Daten und deren Implementierung in den Digitalen Zwilling wird die Bewertbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Bestands- und Zustandsinformationen verbessert und deren Verknüpfung in Raum und Zeit ermöglicht.

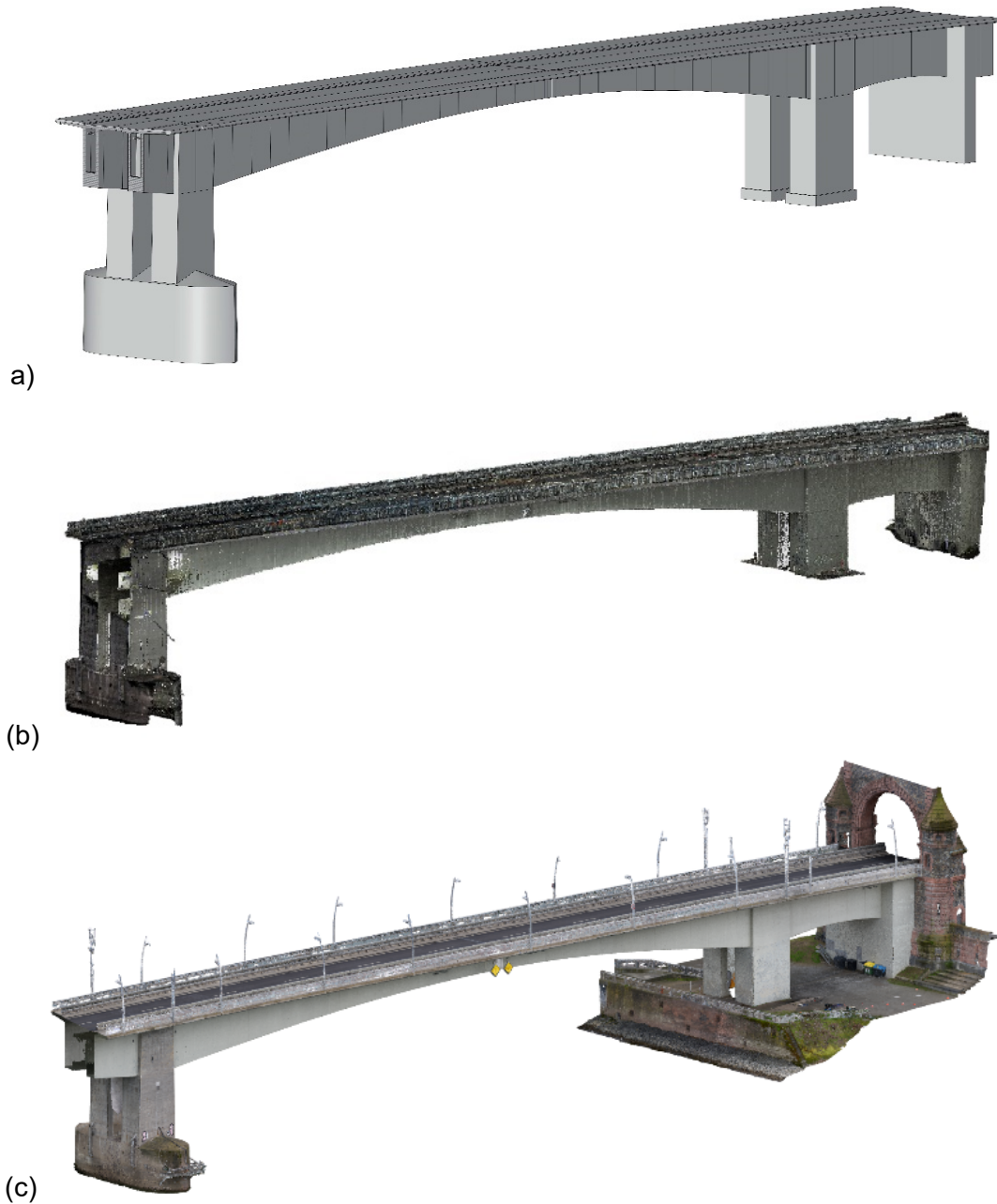


Abb. 6: 3D-Modell der Nibelungenbrücke Worms in Richtung Oberstrom:
 (a) Geometriemodell aus Bestandsplänen; (b) Punktwolke aus Laserscanning
 und (c) Punktwolke aus UAV-Befliegung

Zur Erstellung des as-built Model werden verschiedene Techniken eingesetzt, um die Geometrie des Bauwerks zu vermessen und die Bewehrung inklusive der Spannglieder im Beton zu lokalisieren. Hierfür wird das Bauwerk einschließlich der inneren Geometrie des Hohlkastenträgers mittels Laserscans und Photogrammetrie erfasst und in Form einer Punktwolke (Abb. 6 (b) und (c)) sowie Orthobildern ausgewertet. Ergänzend zur äußeren Bestandsaufnahme werden zerstörungsfreie und -arme Prüfverfahren eingesetzt, um die innere Konstruktion und den Zustand des Bauwerks zu erfassen. Dazu werden Teilbereiche des Bauwerks mittels Georadars und magnetinduktiver Aufnahmen analysiert und die Betonstahl- sowie Spannstahlbewehrung lokalisiert. Darüber hinaus erfolgen Ultraschalluntersuchungen zur Detektion von Hohllagen und noch vorhandenen Verpressfehlern sowie Untersuchungen der Betondruckfestigkeit mit Rückprallhammer, Ultraschall und Bohrkernentnahmen.

5.2 Structural Health Monitoring (SHM)

Das Tragverhalten des Bauwerks kann durch dessen Interaktion mit den äußeren Einwirkungen aus Verkehr und Umwelt charakterisiert werden [16, 17]. Mit Hilfe eines SHM werden in dem Pilotbereich wesentliche Messgrößen am Bauwerk erfasst und nahezu in Echtzeit zur Verfügung gestellt.

Das Monitoring wurde entsprechend Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein (DBV) Merkblatt Brückenmonitoring [18] konzeptioniert, geplant und entsprechend Abb. 7 in verschiedenen Phasen umgesetzt. Auf Grundlage einer Sensitivitätsanalyse des Tragwerkes wurden Fragestellungen definiert, die zur Beurteilung des Tragwerkes beitragen. In einem Monitoringkonzept wurden daraus konkrete Messmaßnahmen abgeleitet und die Lage und Anzahl an Messstellen sowie die Anforderungen an die Sensoren beschrieben. Weiterhin enthält das Monitoringkonzept z. B. Anforderungen an die Messdatenerfassung (Messfrequenzen, Messunsicherheiten, Datenqualität etc.) und infrastrukturelle Anforderungen (Datenspeicherung, Datenübertragung, Datenschutz etc.).

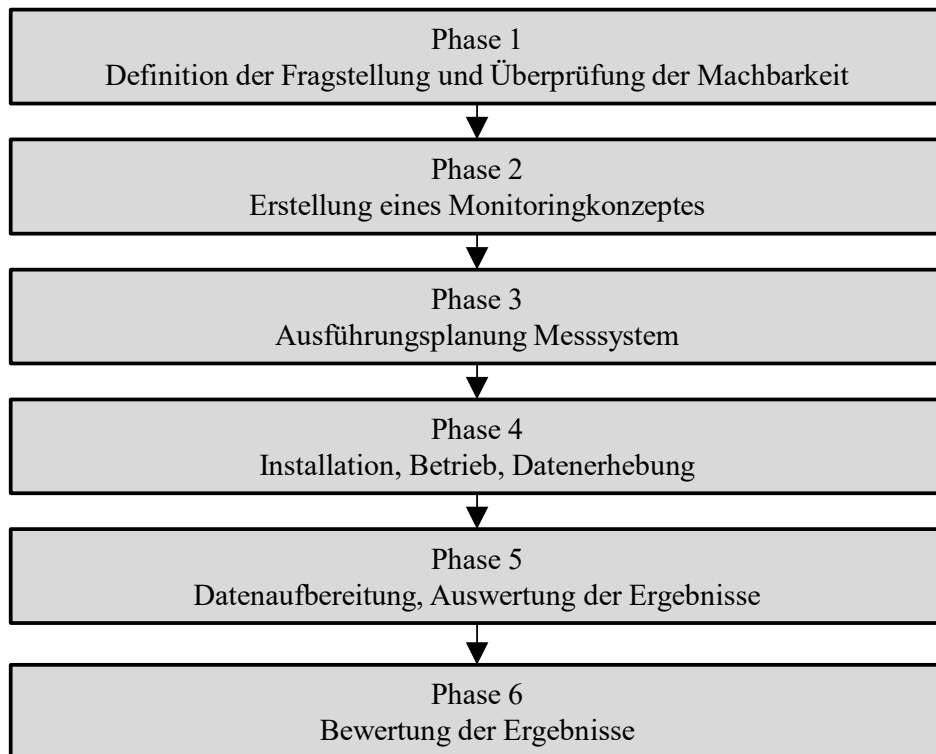


Abb. 7: Schematische Darstellung des Monitoringprozesses. Quelle: DBV, Merkblatt Brückenmonitoring [17]

Im Messkonzept wurden 12 Messmaßnahmen mit insgesamt 25 Messstellen beschrieben. Dazu gehören bspw. die Erfassung von Umwelteinflüssen (Lufttemperaturen und – feuchten, Bauteiltemperaturen, Sonneneinstrahlung, Niederschlag), Bauwerksreaktionen (Längsverschiebung, Neigung, Beschleunigung, Betondehnung) und Verkehrseinflüsse. Die Messdaten des Monitorings werden im Digitalen Zwilling zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 8 und Kapitel 5.5). Eine Erweiterung um Messstellen zur Erfassung von Querkraft- und Korrosionsmessgrößen ist auf Grundlage der noch ausstehenden tiefgreifenden Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.3 und 5.4) vorgesehen.

Das am Bauwerk installierte SHM stellt Daten bereit, die allen Teilprojekten des SPP 100+ für deren Aus- und Bewertungen als Eingangsdaten zur Verfügung stehen und zeigt auf, welche Potenziale ein Bauwerksmonitoring im Rahmen des Erhaltungsmanagements bieten kann [19].

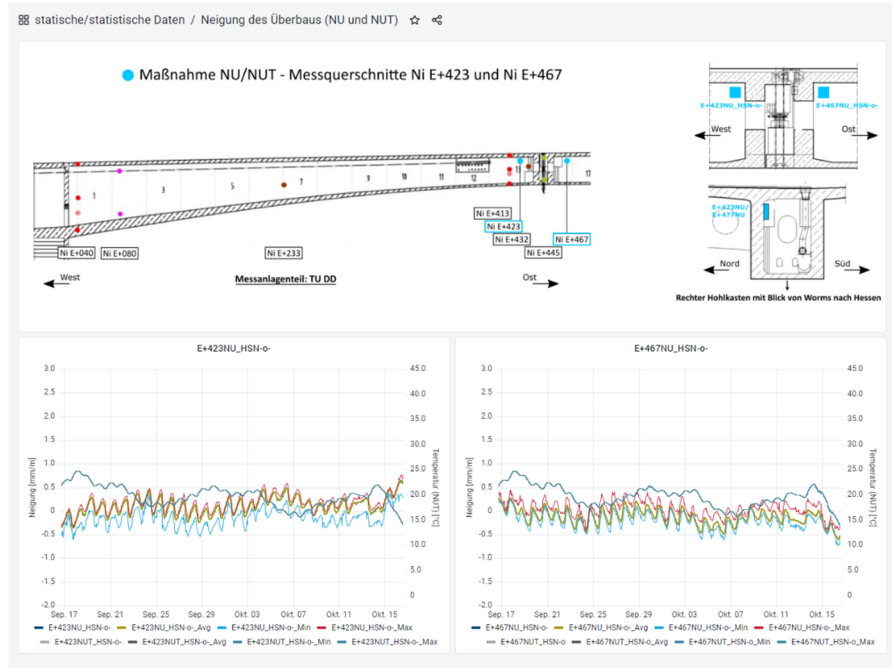


Abb. 8: Messdatenvisualisierung am Beispiel von Neigungsmessungen im Hohlkasten. Quelle: MKP GmbH



Abb. 9: Teile der Monitoringanlage im Inneren des Hohlkastens, links: Neigungs- und Beschleunigungssensoren, rechts: Messschrank. Quelle: MKP GmbH

5.3 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit nach Stufe 4

Die Finite Elemente Methode hat sich mittlerweile zu einem Standard bei der statischen Berechnung von komplexeren Bauwerken entwickelt. Aufgrund der stark verbesserten Rechnerleistungen ist es nun auch möglich, hochgradig materiell und geometrisch nichtlineare Berechnungen von komplexen Modellen innerhalb einer akzeptablen Zeit durchzuführen. Im Zuge einer Nachrechnung von Bestandsbauwerken kann es erforderlich sein, Traglasten mit realitätsnahen Volumenmodellen zu ermitteln, wenn der Nachweis der Tragsicherheit durch vereinfachende Methoden nicht erbracht werden kann.

Nichtlineare FE-Systeme mit Stab- und Schalenelemente scheiden im Regelfall aufgrund der Schubproblematik aus, da diese Elemente das Querkraftverhalten nicht zutreffend abbilden.

Daher wird im Rahmen der Nachrechnung nach Stufe 4 [15] eine räumliche Modellierung der Nibelungenbrücke mit Volumenelementen vorgenommen (Abb. 10 und Abb. 11). Dabei wird die Bauwerksgeometrie entsprechend der Schalpläne genau as-designed abgebildet. Die Spannglieder in Längs- und Querrichtung, alle Bewehrungsstäbe und die Bügelbewehrung werden entsprechend den Spannglied- und Bewehrungsplänen diskret erfasst. Durch diese genaue Abbildung und Berechnung lassen sich Tragfähigkeit und Sicherheit gegen Systemversagen realitätsnah ermitteln. Insbesondere kann das Ankündigungsverhalten des Bauwerks beurteilt werden.

Die Vorgehensweise bei der nichtlinearen Berechnung entspricht den Angaben des DIN-Fachberichtes 102, Anhang 2 „Nichtlineare Verfahren der Schnittgrößenermittlung“ (γ_R -Verfahren). Dabei werden alle Lasten unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte in einem Lastfall betrachtet, da das Superpositionsprinzip nicht zulässig ist. Die Lastaufbringung in einer nichtlinearen FE-Berechnung erfolgt hierbei schrittweise. Zunächst werden alle Freivorbau-Zustände unter Einbeziehung des Eigengewichts und der Vorspannung gerechnet. Danach erfolgt die schrittweise Aufbringung der Verkehrslast, bis das Gebrauchslastniveau (Laststufe GZG) erreicht wird. In den anschließenden Lastschritten werden die ständigen Lasten und die Verkehrslast auf die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte von 1,35 bzw. 1,5 gesteigert. Zur Sicherstellung des nach DIN-Fachbericht 102 geforderten Sicherheitsniveaus muss diese Laststufe mit dem globalen Teilsicherheitsbeiwert für Baustoffkennwerte von 1,3 beaufschlagt werden. Die Laststellung LS GZT bildet damit das Tragfähigkeitsniveau nach DIN-Fachbericht 102 ab. Zu jeder Laststufe muss sich ein stabiles Gleichgewicht im System unter Einhaltung der Grenzdehnungen einstellen, anderenfalls ist die Systemtragfähigkeit nicht mehr gegeben. Das Ingenieurbüro H+P Ingenieure verwendet hierfür das selbstentwickelte nichtlineare Programmpaket LIMFES.

In einer zweiten Stufe soll das FE-Modell so erweitert werden, dass eine Verknüpfung zwischen dem FE-Modell und dem Digitalen Zwilling (Abschnitt 5.5) hergestellt wird. Dazu werden am Bauwerk mit Hilfe bauwerksdiagnostischer Untersuchungen tatsächliche Materialkennwerte (Druckfestigkeit, Wichte, Elastizitätsmodul etc.) ermittelt, sowie der Zustand und die Lage der Spannglieder erfasst. Ergänzend werden aus der Vermessung die tatsächlichen Bauteilgeometrien ermittelt. Mithilfe dieser Erkenntnisse wird das as-designed FE-Modell in ein as-maintained FE-Modell überführt. Darauf aufbauend soll das FE-Modell anhand der Messergebnisse von Belastungsversuchen kalibriert werden [20]. Basierend auf den Ergebnissen der FE-Berechnungen werden kritische Bereiche der Nibelungenbrücke festgelegt. In diesen Bereichen wird ein Messprogramm entwickelt, sodass eine ständige Interaktion zwischen dem digitalen Zwilling und dem FE-Modell stattfindet. Weiterhin werden kritische Schwellenwerte für die Messgrößen festgelegt, die auf Tragfähigkeitsdefizite hinweisen und den Bauwerksverantwortlichen Handlungsbedarf signalisieren.

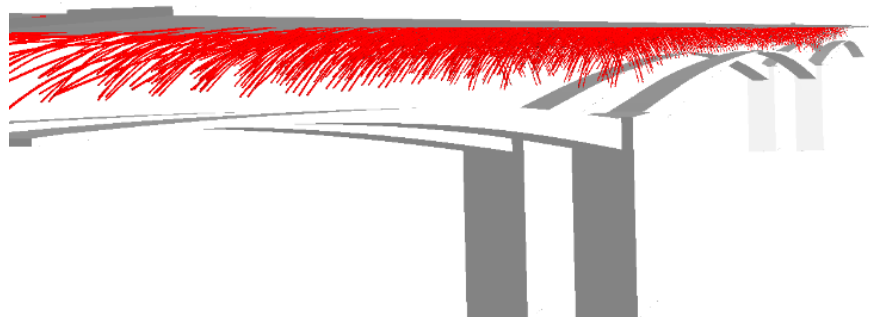


Abb. 10: Bauwerksmodell und Längsspannglieder

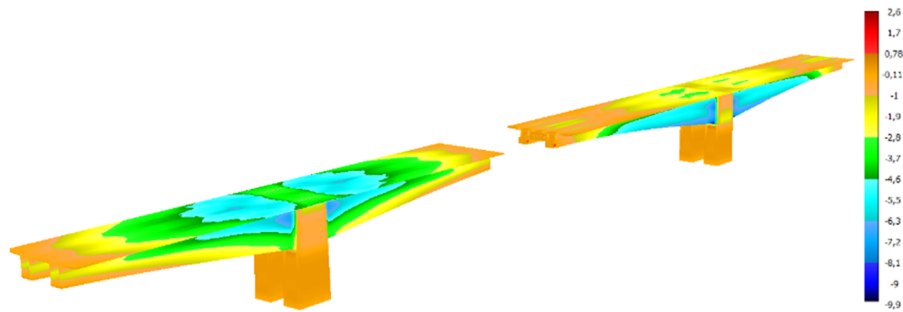


Abb. 11: Längsspannungen im Bauzustand

5.4 Beurteilung der Korrosionsgefahr

Zu Beurteilung der Korrosionsgefahr wird zunächst untersucht, welchen Erfolg die durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen hatten und ob sich seitdem wesentliche Zustandsveränderungen eingestellt haben. Durch die verantwortliche Straßenbaubehörde, dem Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz, wurde dazu dieses Jahr ein Expertenworkshop initiiert, an dem Akteure aus der nun 10 Jahre zurückliegenden Instandsetzung teilnahmen. Dabei wurde das Ziel erreicht, die in den Berichten und Unterlagen vorhandenen Informationen zum Referenzzustand des Bauwerkes durch das Wissen dieser Erfahrungsträger zu erweitern. Mit dieser Kenntnis werden in einem nächsten Schritt bauwerksdiagnostische Untersuchungen geplant und realisiert, um mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren den Fortschritt der Korrosionsschäden zu beurteilen. Erste Potentialfeld-Testmessungen im Inneren des Hohlkastens weisen darauf hin, dass aufgrund der Instandsetzung nahezu keine Hinweise auf Korrosionsaktivität vorliegen. Im Abgleich mit den statischen Untersuchungen werden Bereiche identifiziert, die für die Tragfähigkeit von besonderer Bedeutung sind. In diesen Bereichen werden neben den zerstörungsfreien auch zerstörungsarme Untersuchungen (Sondierungsöffnungen) durchgeführt, um den Zustand der Spannglieder und der Bewehrung zu quantifizieren (Restquerschnitte bestimmen). Diese Erkenntnisse werden in die statischen Modelle integriert, um den aktuellen Zustand des Bauwerkes auch rechnerisch zu berücksichtigen. Auf dieser Grundlage können tatsächliche Bauwerks- und Tragkraftreserven auf der Widerstandsseite ermittelt werden, die für die zukünftige Instandhaltungsstrategie des Bauwerkes von besonderer Bedeutung sind. Die so identifizierten Schwerpunktbereiche, die eine besondere Auswirkung auf die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauwerkes haben, werden im weiteren Lebenszyklus des Bauwerkes intensiver durch die Bauwerksprüfungen, regelmäßige bauwerksdiagnostische Untersuchungen oder mittels Sensorik überwacht und beurteilt. Hierzu werden die Informationen in einen Zustandsindikator im Digitalen Zwilling überführt.

5.5 Der Digitale Zwilling zum Bauwerkserhalt

Für den Pilotbereich der Nibelungenbrücke wird derzeit ein initialer Digitaler Zwilling entwickelt, der für die Teilprojekte des SPP 100+ eine zentrale Plattform zur Bereitstellung der Zustandsinformationen bildet. In Anlehnung an [3] ist der Digitale Zwilling in dieser Anwendungsform „ein digitales Abbild eines physischen Systems, wobei beide bestenfalls über den gesamten Lebenszyklus durch einen automatischen Daten- und Informationsaustausch in Echtzeit miteinander verknüpft sind“. Im Digitalen Zwilling werden zunächst folgende Anwendungsfälle adressiert:

- Dokumentation der Zustandsinformationen aus der regelmäßigen Bauwerksprüfung,
- kontinuierliche Zustandserfassung i. V. m. dem SHM,
- Zustands- und Tragsicherheitsbewertung durch Datenaggregation.

In Anbetracht der Anwendungsfälle kann dem Digitalen Zwilling in dieser ersten Phase ein Reifegrad 2 „informativ“ [3, 21] zugewiesen werden. Daten werden durch intelligente Auswertungs- und Bewertungsalgorithmen zu Informationen verarbeitet, die für Anlagenbetreiber eine wichtige Entscheidungsgrundlage darstellen sollen. Der Reifegrad des Zwillings ist durch seine Datenstruktur und Aggregationslogik skalierbar. So soll der Zwilling durch Integration weiterer Anwendungsfälle perspektivisch zu einem prädiktiven oder auch präskriptiven Reifegrad ausgebaut werden. Wesentliche, aggregierte Informationen werden in einer webbasierten Nutzeroberfläche (Condition Control) über eine intuitive Navigationsmöglichkeit am 3D-Bauwerksmodell visualisiert. Detailinformationen, u. a. Rohdaten und Zwischenergebnisse aus dem Zustandsmonitoring, werden in einer gesonderten Web-Plattform (Expert Control) zur Verfügung gestellt. Beide Plattformen sind bidirektional miteinander verknüpft, sodass der Nutzer jederzeit zwischen den Aggregationsstufen der Informationen wechseln kann.

Die Daten (und Informationen) werden in einem cloudbasierten Datenbank-System verwaltet. In diesem sind die Daten gemäß einer vordefinierten Ontologie strukturiert. Die Grundlage der Ontologie bildet die Bauwerkstaxonomie der ASB-Ing [22]. So können Inhalte des as-maintained BIM-Modell sowie die während des Betriebes anfallenden Daten und Informationen aus den o. g. Anwendungsfällen unmittelbar in den Digitalen Zwilling integriert werden. Das BIM-Bauwerksmodell sowie die BIM-Fachmodelle der jeweiligen Anwendungsfälle (u. a. Modell zur Sensorverortung) werden entsprechend der ASB-Ing [22] geometrisch segmentiert und dienen als Visualisierungsgrundlage in der Webplattform Condition Control (Abb. 12). Durch die Strukturgleiche Segmentierung des 3D-Modells und der Datenbanken kann die Navigation durch die Datenstruktur über das 3D-Modell erfolgen und es besteht immer ein intuitiver, visueller Bezug zwischen ausgewählten Daten und der Zugehörigkeit am Bauwerk.

Für den Anwendungsfall *Dokumentation der regelmäßigen Bauwerksprüfung* werden die im Rahmen der zurückliegenden Bauwerksprüfung erfassten Schäden und Mängel sowie deren deskriptive Informationen und die zugehörigen Fotodokumentationen in der Nutzeroberfläche des Digitalen Zwillings verfügbar gemacht und am 3D-Modell verortet (siehe Abb. 12). Als Datenquelle dient die zentrale Bauwerksdatenbank der Straßenbauverwaltungen SIB-Bauwerke, die einen Export der Prüfergebnisse als cab-Datei ermöglicht. Die Einzelinformationen zu den Schäden und Mängeln werden aus diesem Exportformat ausgelesen und entsprechend der Ontologie des Digitalen Zwillings in den Cloudspeicher überführt. Eine geometrische Verortung erfolgt basierend auf den Dokumentationen der Bauwerksprüfenden in einem BIM-Fachmodell *Schäden und Mängel* und wird über die Schadens-ID mit den Daten im Cloudspeicher verknüpft.

Analog zu den Schäden werden auch die installierten Messstellen in einem BIM-Fachmodell verortet und über eine eindeutige ID mit dem Cloudspeicher verknüpft. Neben der Verortung und Darstellung aggregierter Informationen in Condition Control können die detaillierten Messwerte im Expert Control für Plausibilitätsprüfungen und weiterführende Analysen in nahezu Echtzeit konsumiert werden.

Neben der reinen visuellen Darstellung (siehe Abb. 8) der Messdaten kann ein Datenabruf über eine definierte Schnittstelle in Form eines Application-Programming-Interface (API) erfolgen. Dies gibt den Teilprojekten des SPP 100+ die Möglichkeit, die Messdaten einschließlich der Metadaten für eigene Analysen zu verwenden und so die Forschungsergebnisse direkt mit Hilfe des realen Bauwerks zu validieren.

Im Anwendungsfall *Zustands- und Tragsicherheitsbewertung durch Datenaggregation* werden die Querkraft- und Korrosionsproblematik beispielhaft im initialen Digitalen Zwilling des Pilotbereichs mit einem Zustandsindikator (Condition Indicator – CI) und einem Tragsicherheitsindikator (Structural Safety Indicator – SSI) bewertet. Die Datengrundlage für die

Bewertungen setzt sich aus Teilmengen der Bauwerksprüfung, der diagnostischen Untersuchungen, der Nachrechnungen und der Monitoringdaten zusammen.



Abb. 12: Konzeptionelle Visualisierung des Anwendungsfalls *Dokumentation der regelmäßigen Bauwerksprüfung* anhand eines Beispielschadens im Condition Control. Quelle: MKP GmbH

Für den CI Korrosion ist beispielweise vorgesehen, in den im Kapitel 5 bereits genannten Schwerpunktbereichen Korrosionssensoren zu installieren und in das SHM einzubinden. Diese Sensoren liefern Messwerte, die Aussagen zur Bauteilfeuchte und zur vorliegenden Korrosionsaktivität zulassen. Die Bewertung der erfassten Messdaten erfolgt über automatisierte Auswerteprozesse im Digitalen Zwilling und wird in aggregierter Form als Zustandsindikatoren in Condition Control wiedergegeben. Die Bauwerksverantwortlichen behalten so mögliche Änderungen im Blick und werden durch vordefinierte Handlungsempfehlungen in ihrer Arbeit unterstützt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

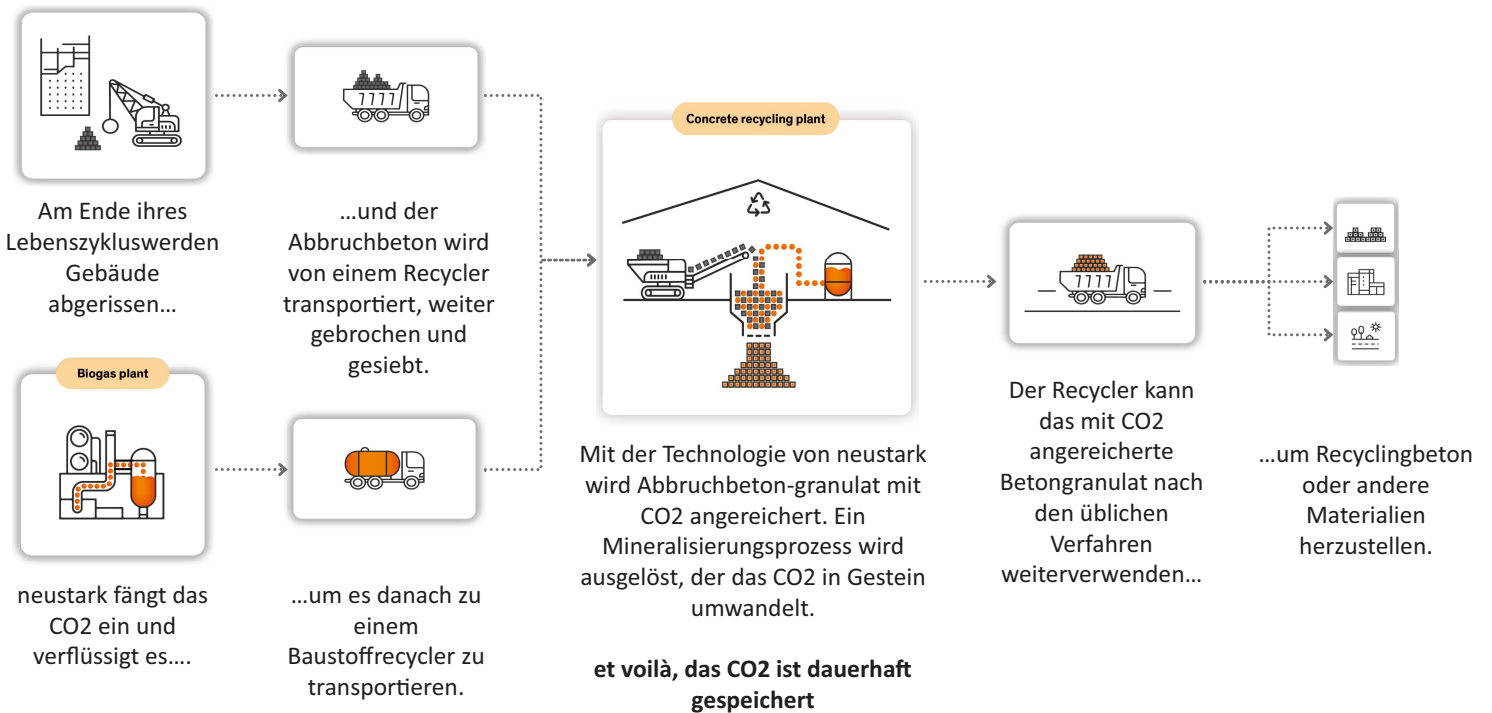
Die Nibelungenbrücke ist eine Ikone der Spannbetonbauweise. Sie wurde vom BMDV in Kooperation mit dem SPP 100+ als prototypisches Pilotprojekt initiiert, um die digital unterstützte Instandhaltung von Infrastrukturbauwerken zu erforschen. Bis Sommer 2023 wurde ein 3D-Modell der Brücke anhand von Bestandsunterlagen, eine 3D Vermessung sowie ein SHM System fertiggestellt. Derzeit läuft die Bearbeitung der Stufe 4 Nachrechnung zum Querkrafttragverhalten und die Beurteilung der Korrosionsproblematik, um entsprechende Zustandsindikatoren zu entwickeln. Darüber hinaus wird momentan der Digitale Zwilling in einem Pilotbereich umgesetzt. Dieser fasst wesentliche Maßnahmen zum Bauwerkserhalt zusammen und stellt als zentrale Plattform die Zustandsinformationen des Bauwerks bereit. Dadurch können die im SPP100+ entwickelten wissenschaftlichen Methoden erforscht, erprobt, validiert sowie weitere digital unterstützte Bauwerkserhaltungsstrategien entwickelt werden. Derzeit sind die meisten Maßnahmen auf einen Pilotbereich konzentriert. Eine Ausweitung dieses Systems auf die gesamte Brücke einschließlich einer funktionalen Erweiterung ist derzeit in Planung. Durch die Bündelung neuester Arbeitsweisen und Methoden am Digitalen Zwilling soll aufgezeigt werden, wie die Digitalisierung der Instandhaltung die Lebensdauer von Infrastrukturbauwerken verlängern kann. Die Nibelungenbrücke soll zukünftig auch als Ikone der Digitalen Transformation ihrem Nutzen weiter dienen.

Referenzen

1. Statistisches Bundesamt, Abfallaufkommen im Jahr 2021, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_213_321.html, accessed 5 July 2023.
2. M. Grabe, C. Ullerich, M. Wenner, M. Herbrand, smartBridge Hamburg – prototypische Pilotierung eines digitalen Zwilling, Bautechnik 97 (2020) 118–125. 10.1002/bate.201900108.
3. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Digitaler Zwilling von Brücken - Beitrag zum Masterplan Digitaler Zwilling Bundesfernstraßen, zum Redaktionszeitpunkt unveröffentlicht.
4. Maria Justine Bange, Steffen Marx, Katja Voland, DBV Heft 51 Digitaler Zwilling: Strategie für den Bestandserhalt, 2021.
5. M. Pregolato, S. Gunner, E. Voyagaki, R. de Risi, N. Carhart, G. Gavriel, P. Tully, T. Tryfonas, J. Macdonald, C. Taylor, Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure, Automation in Construction 141 (2022) 104421. 10.1016/j.autcon.2022.104421.
6. U. Finsterwalder, H. Schambeck, Von der Lahnbrücke Balduinstein bis zur Rheinbrücke Bendorf: Die Entwicklung des freien Vorbaues von Spannbetonbrücken, Bauingenieur 40 (1965) 85–91.
7. U. Finsterwalder, Bau der Straßenbrücke über den Rhein in Worms, Beton- und Stahlbetonbau 48 (1953) 1–5.
8. C. Dicleli, Die Nibelungenbrücke Worms, 1st ed., Bundesingenieurkammer, Berlin, 2020.
9. R. Kaiser, V. Jakobi, B. Knoop, Vorwort, in: Die Nibelungenbrücke in Worms: Zur Zukunft eines bedeutenden Ingenieurbauwerks, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 2023, pp. 6–7.
10. E. Pelke, T. Zichner, Ertüchtigung der Nibelungenbrücke Worms, Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 113–130. 10.1002/best.201400082.
11. Andreas Jackmuth, Die Erhaltungsproblematik der alten Nibelungenbrücke Worms. Hintergründe und Stand der Planungen, in: Die Nibelungenbrücke in Worms: Zur Zukunft eines bedeutenden Ingenieurbauwerks, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 2023, pp. 47–55.
12. Spannbeton: Richtlinien für Bemessung und Ausführung, 1953.
13. E. Brühwiler, Zur Überprüfung der Tragsicherheit der Nibelungenbrücke, in: Die Nibelungenbrücke in Worms: Zur Zukunft eines bedeutenden Ingenieurbauwerks, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 2023, pp. 99–107.
14. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung - Abteilung Straßenbau, Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), 2011.
15. C. Cremona, J. Santos, Structural Health Monitoring as a Big-Data Problem, Structural Engineering International 28 (2018) 243–254. 10.1080/10168664.2018.1461536.
16. M. Mishra, P.B. Lourenço, G.V. Ramana, Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review, Journal of Building Engineering 48 (2022) 103954. 10.1016/j.job.2021.103954.
17. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V., Merkblatt Brückenmonitoring: Planung, Ausschreibung und Umsetzung, Eigenverlag, Berlin, 2018.
18. G. Marzahn, Überarbeitung der DIN 1076 - aktueller Sachstand, in: 32. Dresdener Brückenbausymposium, pp. 13–15.
19. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Richtlinie Belastungsversuche an Betonbauwerken, Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
20. A. Lazoglu, A. Bartsch, H. Naraniecki, D. Oberhauser, S. Marx, Ein Digitaler Zwilling für die Filstalbrücken entsteht, in: Fachkongress Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur, pp. 225–236.
21. Bundesministerium für Verkehr Bau- und Stadtentwicklung, ASB-ING: Anweisung Straßeninformationsbank, Segment Bauwerksdaten, 2013.

Deutschlandpremiere!

CO₂-Speicherung im Betonrecycling- kreislauf



Unsere Meilensteine

- 2022**
Gemeinsames Pilotprojekt zum erstmaligen Einsatz von ressourcenschonendem Transportbeton in einem Berliner Bauvorhaben
Weitere Projektpartner: SenUMVK Berlin (Initiator), Berger Beton, ifeu Heidelberg
- Ende 2022**
Entscheid für eine langfristige Zusammenarbeit zur Entfernung von CO₂ in Abbruchbeton
- Januar 2023**
Start der Projektentwicklung
- März 2023**
Start der Planungs- und Engineeringarbeiten
- Bis September 2023**
Installation und Inbetriebnahme

Wichtiges zur Anlage

- 1 Erste Anlage in Deutschland, die CO₂ in Abbruchbeton speichert**
- 2 > 1'000 Tonnen CO₂-Speicherkapazität pro Jahr**
- 3 Produkttyp: Reihendoseur**
- 4 Seit September 2023 in Betrieb**

Zahlen und Fakten


50 Kubikmeter Kapazität der CO ₂ -Tanks	1-2 Mal pro Woche wird das CO ₂ in 20m ³ grossen Isotainern geliefert	1.5 Stunden dauert die Befüllung eines Tanks mit dem gelieferten CO ₂ -Volumen von 20m ³
1'500 Kilogramm CO ₂ bearbeitet ein atmosphärischer passiver Verdampfer pro Stunde	4 Kammern à 50m ³ fassen 320 Tonnen Abbruchmaterial	
Materialarten verschiedene Fraktionen von R01 0+2 und 0+4, R02 0+2 und 0+4 sowie Hochbaufraktionen RC-GK		
200'000 Tonnen Materialdurchsatz pro Jahr		
0.5-11 Stunden Zykluszeiten der CO ₂ -Injektionsysteme, je nach Material		

Woher kommt das CO₂?

Das CO₂, das hier gespeichert wird, ist biogen. Als Quelle fungiert Neustark-Partner und Biomethanhandelsunternehmen Landwärme GmbH.

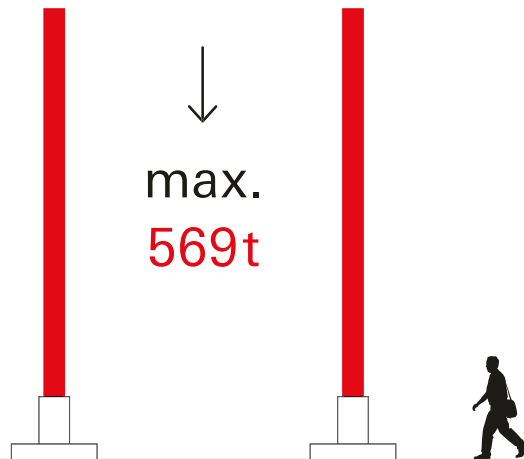
Landwärme bezieht das CO₂ für diese Anlage hauptsächlich von der MVV Energie AG. Das bei der Aufbereitung zu Biomethan anfallende CO₂ wird bei der Biomasse-Vergärung der MVV in Dresden bereits seit 2021 abgeschieden. Ein Teil davon wird innerbetrieblich genutzt, ein weiterer Teil – ca. 1'000 Tonnen CO₂ pro Jahr – wird nun hier auf dem Recycling-Gelände von HEIM gespeichert.

Und da das CO₂ biogen ist, erzeugen wir mit dem Gesamtprozess wichtige Negativemissionen.



BauBuche besitzt eine **außergewöhnlich hohe Tragfähigkeit** und ermöglicht schlankere Bauteile sowie größere Spannweiten im konstruktiven Holzbau.

Der Hochleistungsbaustoff **BauBuche** eignet sich hervorragend für die Anwendung als stabförmiges Bauteil sowie für Belastungen in Faserrichtung. Das macht **BauBuche** als Stütze und Zug-/Druckstrebe besonders geeignet.



max.
569t

BauBuche GL75 Stütze 32/56
Druckfestigkeit in NK1: 59,4 – 70 N/mm²

Plangrafik: HK Architekten, AT

Ressourcen- und energieeffiziente hybride Konstruktionen

Prof. Dr.-Ing. Achim Bleicher, Tim Höltke, Dr.-Ing. Yangwen Zhang,
Robert Jirasek, Paul Marker
BTU Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau
fg-hybride-konstruktionen-massivbau@b-tu.de

Dieser Beitrag wurde bereits in der Zeitschrift Bautechnik mit dem Titel "Hybride Konstruktionen an der BTU Cottbus-Senftenberg" unter folgender Autorenschaft veröffentlicht:

Bleicher, A.; Schauer, T.; Jirasek, R.; Höltke, T.; Zhang, Y.; Marker, P.; Wulff, W.; Manfrecola, J.; Schmidt, T. (2021) Hybride Konstruktionen an der BTU Cottbus-Senftenberg. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202100056>

1. Einleitung

Hybride Konstruktionen lassen sich verschiedentlich definieren, charakteristisch ist aber in allen Fällen die Kombination von unterschiedlichen Materialien, Elementen, Funktionen und Technologien, die auf mehreren Konstruktionsebenen wie der Werkstoff-, Querschnitts-, Tragwerks- oder Bauwerksebene zu einer vielseitigen Effizienzsteigerung führen [1]. Mit diesem Ansatz stehen hybride Konstruktionen ganz in der Tradition des Leichtbaus. Bei den „klassischen“ hybriden Konstruktionen werden vornehmlich verschiedene Materialien zu Verbundwerkstoffen (bspw. Stahl-, Textil- und Carbonbeton) bzw. zu Verbundquerschnitten (bspw. Stahl- und Holz-Beton-Verbund) kombiniert [2, 3]. Eine ökologische Weiterentwicklung dieses Ansatzes wird in Abschnitt 2 aufgezeigt. Darüber hinaus können durch geschickte Kombinationen von normal- und biegebeanspruchten Tragelementen (bspw. unterspannter Träger, seilgestützte Tragwerke) mehr als nur materialminimierte Konstruktionen erzielt werden. Vielmehr eröffnen hybride Konstruktionen über einen intelligenten Lastabtrag, mit größeren Spannweiten und einfacheren Bauverfahren, eine vielfältige Baukultur [4].

Um Rohstoffvorräte zu schonen, muss ein konsequenter Leichtbau das Gebot der kommenden Bauwerksgenerationen sein. Damit verbunden sind große Herausforderungen, insbesondere, da sich infolge der Minimierung des Konstruktionsgewichts die Sensibilität der Tragstruktur gegenüber zeitlich und örtlich veränderlichen Einwirkungen erhöht. Eine konsequente Weiterentwicklung zielt daher auf die aktive Beeinflussung der Tragwerksantwort auf beliebige Einwirkungen und sich ändernde Randbedingungen hin. Die ganzheitliche Integration und Kombination innovativer Technologien und aktiver Ansätze lässt eine neue Generation hybrider Konstruktionen entstehen. International gibt es schon seit längerer Zeit Ansätze und erfolgreiche Realisierungen aktiver Tragwerke [5]. Untersuchungen im Leicht- und Ultraleichtbau sind dagegen eher selten und insbesondere in der Forschung zu finden. Hier sind beispielsweise die Demonstratoren an der Universität Stuttgart und der TU Berlin zu nennen [6–8]. Eine Weiterentwicklung dieser aktiven Ansätze hin zu energieeffizienten und autarken hybriden Konstruktionen wird in Abschnitt 3 aufgezeigt.

Kombiniert man tragende und funktionale Anforderungen im Sinne von „Tragwerk ist Hülle“ und „Hülle ist Tragwerk“ (bspw. Infralichtbeton, Monocoque-Bauweise), kann die Leistungsfähigkeit der Bauteile hinsichtlich einer Multifunktionalität weiter gesteigert werden [9, 10]. Darüber hinaus ermöglichen wandelbare Konstruktionen eine flexible Nutzung [11]. Ressourceneffizient lässt sich dies nur durch konsequenten Leichtbau und eine hybride Konstruktionsphilosophie realisieren. Diese Gedanken werden in Abschnitt 4 aufgenommen.

Der Ansatz aktiver und hybrider Leichtbauweisen ist mit neuen und vor allem interdisziplinären Herausforderungen verbunden. Um die Studierenden an die erforderlichen Methoden heranzuführen, bietet der Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau an der BTU unter anderem die Master-Schwerpunktmodule „Aktive Tragwerke“, „Vorgespannte Tragwerke“ und „Projekt Hybride Konstruktionen“ an. Diese werden werkstoffübergreifend, interdisziplinär sowie eng verzahnt mit den anstehenden Forschungsthemen gelehrt. Hybrides Entwerfen und Konstruieren, also die ganzheitliche Integration neuer Technologien zur Auslegung aktiver Tragwerke, stehen hierbei im Fokus. Zudem leistet die Kombination aus experimentellen, numerischen und analytischen Untersuchungen zur Absicherung der Ergebnisse einen wichtigen Beitrag zur Abstimmung unterschiedlicher Modelle.

Die hybride Konstruktionsphilosophie auf der Grundlage des Leichtbaus liefert vielfältige Lösungen, um den aktuellen Aufgaben und Anforderungen gerecht zu werden. In den drei nachfolgend beschriebenen Forschungsprojekten werden hybride Konstruktionen mit einem Fokus auf Ressourcenschonung, Energiegewinnung und Multifunktionalität vorgestellt.

2. Hybride Konstruktionen zur Ressourcenschonung

2.1 Motivation und Zielstellung

Neue Brandschutzstrategien ermöglichen innovative Trag- und Aussteifungskonzepte für den Hochhausbau aus Holz. Als nachwachsender Konstruktionswerkstoff erzielt Holz in Kombination mit Beton derzeit regelmäßig neue Höhenrekorde und bietet gleichzeitig ein hohes CO₂- und Energieeinsparpotenzial. Durch die Verwendung von Recyclingbeton lässt sich dieses Potenzial weiter steigern.

Holz und Beton im Verbund kommen primär in den Geschosdecken zum Einsatz, um den Schall- und Brandschutz zu gewährleisten. Zur Abtragung der vertikalen und horizontalen Lasten bzw. zur Aussteifung wurden zwischenzeitlich verschiedene Konzepte entwickelt und ausgeführt: (1) Kern aus Stahlbeton mit angeschlossenen Holzskelettbau, (2) Holzskelettbau, aussteift durch Kern bzw. Wandscheiben aus Brettsperrholz, und (3) Holzskelettbau, aussteift durch Holzfachwerk. Der Holzskelettbau besteht dabei meist aus einem einfeldrigen Brettstapel-, Brettsperrholz- oder Holz-Beton-Verbund-Deckensystem und gelenkig angeschlossenen Holzstützen [12–14].

Eine Alternative sind mehrfeldrige und mehrgeschossige Rahmensysteme mit biegetragfähigen Knoten, die sich planmäßig am horizontalen Lastabtrag beteiligen und sich bei großen Bauwerkshöhen effizient mit einem (exzentrischen) Kern kombinieren lassen [15]. Als wesentlicher Vorteil sind hier die höheren Redundanzen bzw. Umlagerungsmöglichkeiten in der Tragstruktur gegenüber außergewöhnlichen Beanspruchungen wie beispielsweise Stützenausfall zu nennen.

Das Forschungsvorhaben am Lehrstuhl fokussiert sich hierbei auf die Entwicklung und Optimierung biegetragfähiger, robuster und duktiler Knoten, wobei zur effizienten Abtragung der hohen Normalkräfte in den Holzstützen und der Biegemomente im Holz-Beton-Verbundriegel das Furnierschichtholz BauBuche der Pollmeier Massivholz GmbH mit der hohen Festigkeit GL 75 zum Einsatz kommt.

2.2 Holz-Beton-Verbundrahmensystem zur Aussteifung von Hochbauten

Bei der Entwicklung des Holz-Beton-Verbundrahmensystems (HBV-Rahmen) mit integrierten biegetragfähigen Knoten wurde auf ein hohes Maß an Elementierung und Vorfertigung geachtet, um zeitintensive Arbeiten auf der Baustelle zu minimieren. Der Aufbau des HBV-Rahmens beginnt mit der unteren Stützenreihe (Abb.1). Es folgen die Holzträger, welche in einer maximal

produzier- und transportierbaren Länge geliefert und bei größeren Gebäude-abmessungen gestoßen werden. Über das am Knoten eingesteckte Stahleinbauteil können Normalkräfte, Biegemomente und Querkräfte ohne Querpressung des Holzträgers übertragen werden. Der Anschluss der Stützen an das Stahleinbauteil erfolgt über Stabdübel. Anschließend werden (Halb-)Fertigteile zur Ausbildung der Deckenplatte auf die Holzträger gelegt. Mittels Ortbetonergänzung wird der Verbund (1) zwischen Holzträger und Betonplatte durch Kerfen bzw. Nocken und Schrauben, (2) zur Stütz- und Rahmenbewehrung des Verbundträgers und (3) für die Durchlaufträgerwirkung der Deckenplatte quer zum Verbundträger hergestellt. Alternativ zur Flachdecke sind auch kraftflussoptimierte Rippendecken oder Holz-Beton-Verbund- bzw. Brettstapeldecken als (Halb-)Fertigteile zur weiteren Einsparung von Beton denkbar. Final wird die obere Stütze analog zur unteren Stütze angeschlossen.

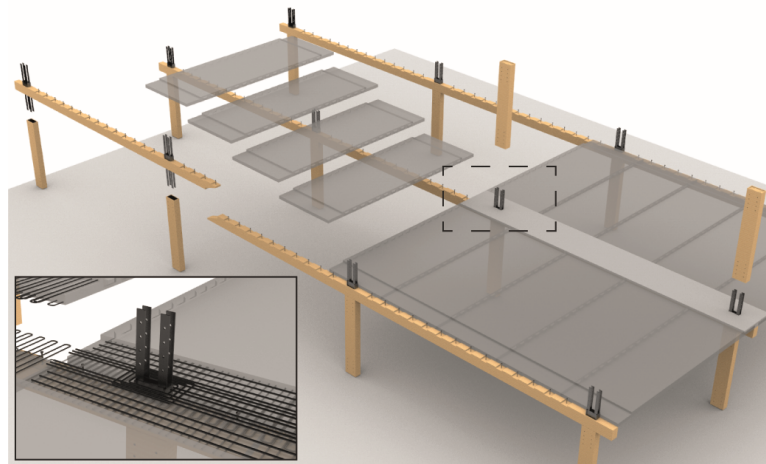


Abb. 1: Montagekonzept des Holz-Beton-Verbundrahmensystems mit biegetragfähigen Knoten

2.3 Analytische und numerische Untersuchungen des Tragverhaltens

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf die Untersuchung des Tragverhaltens zur Abtragung von horizontalen Windlasten sowie vertikalen Eigen- und Nutzlasten.

Tab. 1: Parameter der Versuchsserie für Versuchskörper VK 1 bis VK 6

Parameter		VK 1	VK 2	VK 3	VK 4	VK 5	VK 6
$b_{s,b}$	[mm]	300	300	300	300	500	300
$b_{s,p}$	[mm]	360	360	360	360	560	360
$b_{t,c}$	[mm]	400	400	400	400	600	400
$h_{c,g}$	[mm]	150	150	100	150	150	150
$h_{t,g}$	[mm]	300	300	300	200	300	300
$l_{t,g}$	[mm]	1650	1650	1650	1650	1550	1650
$l_{t,c}$	[mm]	1070	1070	1111	1154	1070	1070
$l_{t,uc}$	[mm]	1285	1285	1294	1301	1285	1285
Querzugverstärkung		ja	ja	nein	nein	ja	nein
Betonfestigkeit f_{ck}		C25/30	RC16/20	C25/30	C20/25	C25/30	C25/30
Bruchlast	[kN]	132	116	122	88	141	128

Zur Generierung der Rahmenschnittgrößen aus der bereits genannten Lastkombination werden die Kraft F_1 und die betragsmäßig gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräfte F_2 aufgebracht (Abb. 2).

Die Normalkraft F_1 überdrückt hierbei einen Großteil der Biegezugspannungen aus F_2 in der Stütze. Der grundsätzliche Kraftfluss konnte mithilfe von Stabwerkmodellen analysiert und dargestellt werden [16]. Für weitere Analysen wurden insgesamt sechs Versuchskörper (VK) unter Variation verschiedener Knotenparameter (siehe Tab. 1 und Abb. 2) untersucht.

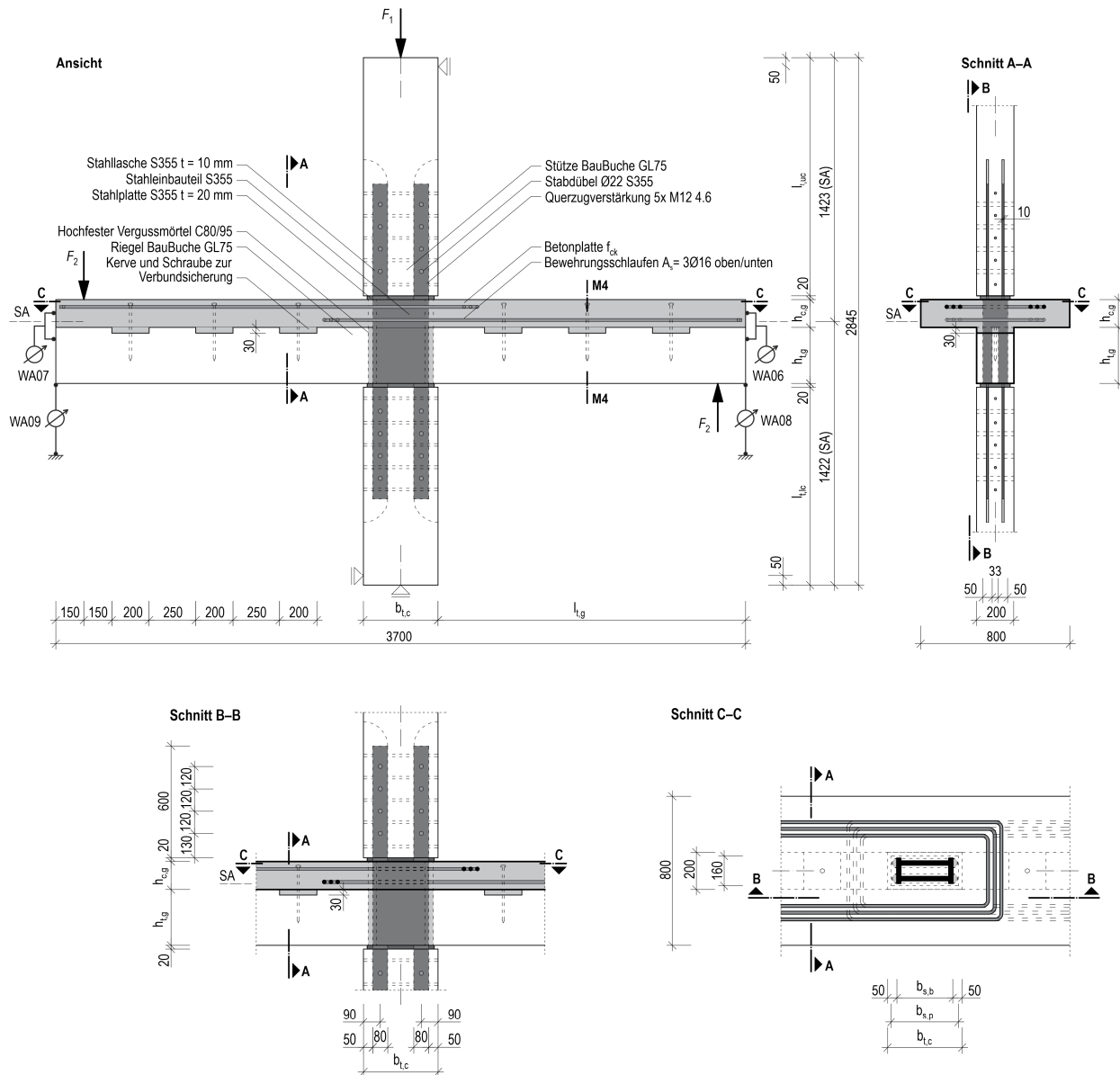


Abb. 2: Geometrie und Aufbau des biegetragfähigen Knotens im Holz-Beton-Verbundrahmensystem, Parameter siehe Tab. 1

Zunächst wurde unter Annahme eines starren Verbunds die elastische Dehnungsverteilung am Rand des Diskontinuitätsbereichs (siehe Messebene M4 in Abb. 2) analytisch ermittelt (Abb. 3a). Für eine realitätsnahe Erfassung des Last-Verformungs- und Bruchverhaltens unter Berücksichtigung des nachgiebigen Verbunds wurde ein numerisches Modell mithilfe der Software ANSYS erstellt. Die gewonnene Dehnungsverteilung in VK 1 aus einem Schnitt durch das Modell

(Abb. 3b) bei 100 % Bruchlast zeigt den Einfluss der nachgiebigen Kervenverbindung durch einen Dehnungssprung im braun gekennzeichneten Holzquerschnitt.

2.4 Experimentelle Verifizierung

Zur Verifizierung der numerischen Ergebnisse wurden sechs Versuchskörper im Maßstab 1:1 (Tab. 1) in der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMPA) der BTU Cottbus-Senftenberg hergestellt und im Versuchsstand bis zum Bruch belastet. Für eine gute Vergleichbarkeit bei den Festigkeiten wurde der Beton auf Basis eigener Voruntersuchungen selbst hergestellt. Für den Versuchskörper 2 wurde ein Beton aus 100 % recycelten Gesteinskörnungen verwendet.

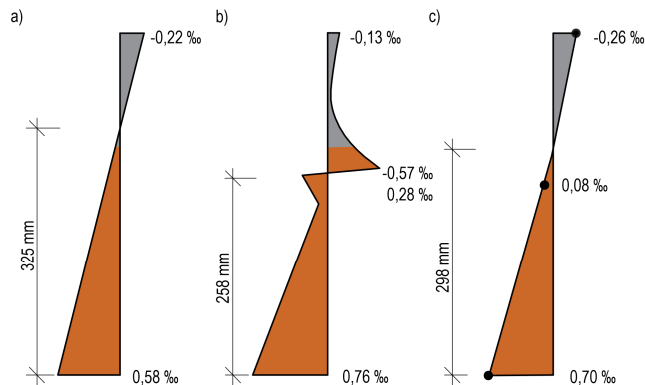


Abb. 3: Dehnungen im Verbundquerschnitt in VK 1 in Messebene M4:
a) analytisch, b) numerisch, c) experimentell

Die Belastung erfolgte entsprechend Abb. 2, wobei für alle Versuchskörper $F_1 = 800$ kN konstant gehalten wurde. Die Kräfte F_2 wurden aufgrund der ungleichen Verbundträgersteifigkeiten in Krafrichtung kraftgeregelt aufgebracht. Anhand der so gewonnenen experimentellen Daten konnte eine erste Validierung der Modelle vorgenommen werden. Die relative Verschiebung zwischen Beton und Holz in der Verbundfuge beträgt am Wegaufnehmer WA06 (Abb. 2) 0,35 mm und im Modell 0,21 mm. Die gemessene vertikale Verformung am Wegaufnehmer WA08 (Abb. 2) beträgt 35,22 mm und im Modell 38,16 mm. Die aufgetragene bilineare Dehnungsverteilung (Abb. 3c) wurde aus drei diskret gemessenen Werten generiert. Der Vergleich zeigt gute Übereinstimmungen bei den lokalen und globalen Verformungen sowie im betrachteten elastischen Bereich. In den Diskontinuitätsbereichen sind weitere Analysen erforderlich.

Für die sechs Versuchskörper sind die Bruchlasten in Tab. 1 und die Last-Verformungs-Kurven in Abb. 4 dargestellt.

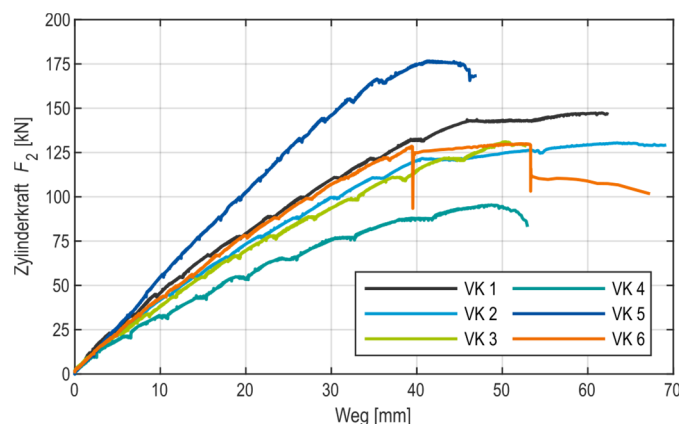


Abb. 4: Last-Verformungs-Diagramm der Versuchskörper VK 1 bis VK 6 am linken Trägerende (WA09 in Bild 2)

Die Auswertung der Bruchmechanismen ist noch nicht vollständig abgeschlossen, weshalb wir uns hier auf die Darstellung erster Erkenntnisse beschränken. Die Last-Verformungs-Kurven in Abb. 4 zeigen ein unterschiedliches Nachbruchverhalten. Bei den Versuchskörpern 1 und 2 ist ein duktileres Verhalten zu erkennen, bei den Versuchskörpern 3 bis 6 fällt die Last nach Erreichen der Bruchlast ab.

Bei fast allen Versuchskörpern tritt das Versagen, wie in den Voruntersuchungen angestrebt, im Verbundträger direkt an der Stütze auf, wobei die Art des Versagens aufgrund verschiedener Einflüsse differenziert zu betrachten ist. In Abb. 5a ist beispielsweise das Schubversagen im Holzträger von Versuchskörper 4 zu erkennen und in Bild 5b das Versagen der Betonplatte von Versuchskörper 5 durch eine starke Rissbildung.

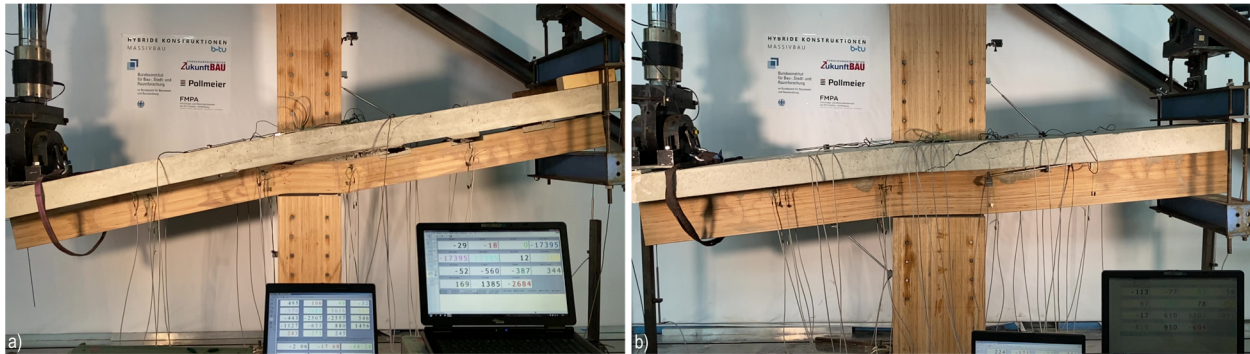


Abb. 5: Bruchbilder der Versuchskörper: a) Schubversagen im Holzträger von VK 4, b) Versagen der Betonplatte von VK 5

Neben der Identifikation von Bruchmechanismen und der Validierung der Modelle werden die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf das Trag- und Verformungsverhalten analysiert. Darauf aufbauend wird ein ingenieurmäßiges Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit und Rotationsfähigkeit nach dem Vorbild der Komponentenmethode [17] abgeleitet. Für eine schnelle Etablierung dieser nachhaltigen Bauweise sollen schließlich Empfehlungen zur Ausbildung biegetragfähiger, robuster und duktiler Knoten in Holz-Beton-Verbundrahmensystemen für die Praxis ausgesprochen werden.

3. Hybride Konstruktionen zur Energiegewinnung und Schwingungs-dämpfung

3.1 Motivation und Zielstellung

Die Effekte aus dynamischer Windeinwirkung auf Bauwerke lassen sich durch eine Optimierung der umströmten Bauwerksgeometrie nur bis zu einem gewissen Grad reduzieren. Für weitere Verbesserungen der Gebrauchstauglichkeit bzw. des Schwingungsverhaltens, insbesondere bei sehr schlanken Hochhäusern (Breite/Höhe = 1:7 bis aktuell 1:23), werden bisher zwei grundlegende Ansätze verfolgt. Entweder wird die Reduzierung von Schwingungen durch Steifigkeit und/oder Masse oder durch die gezielte Beeinflussung mittels zusätzlicher Systeme (passiv, semiaktiv, aktiv und hybrid) realisiert. In der Regel erfordert die Wirkungsweise der zusätzlichen Systeme (1) einen großen Bauraum, (2) eine große zusätzliche Tilgermasse von mehreren Hundert Tonnen, die über (3) eine materialintensivere Tragstruktur abgetragen werden muss, und/oder (4) zusätzliche Energie für deren Betrieb.

Das Potenzial der Windenergie zur Energiegewinnung an großen Fassadenflächen – vergleichbar mit den aus der Fahrzeugtechnik bekannten Ansätzen und Anwendungen der Energiegewinnung aus Bewegungsenergie – wird bisher nicht genutzt. Genau hier setzt das interdisziplinäre Verbundprojekt an. Zusammen mit dem Fachgebiet Regelungssysteme der TU

Berlin und der Josef Gartner GmbH erarbeiten Bauingenieure, Regelungstechniker, Maschinenbauer, Leistungselektroniker und Fas-sadenbauer Grundlagen zur Entwicklung eines autarken semiaktiven bzw. aktiven Systems zur Schwingungsdämpfung bis hin zur Realisierung eines 1:1-Fassadenprototyps.

Hierbei wird der Ansatz verfolgt, ressourcenschonend und energieeffizient eine bereits vorhandene Masse und deren Bauraum in Form einer beweglichen Doppelfassade zu nutzen. Somit übernimmt die Doppelfassade neben den bekannten Funktionen, beispielsweise den Schutz variabler Verschattungen, die natürliche Lüftung (Zu- /Abluft, Zirkulation), den verbesserten Schallschutz [18], die Funktion eines über die Fassadenbreite und -höhe verteilten Energie-Harvesters und Schwingungsdämpfers.

3.2 Ansatz und Funktionsweise

Ziel ist es, sowohl die windinduzierten Gebäudeschwingungen zu dämpfen als auch die aus diesen Schwingungen gewonnene Energie in einer Batterie zu speichern und bei Bedarf zur semiaktiven bzw. aktiven Schwingungsdämpfung zu nutzen. Die Windanregung erfolgt dabei primär durch Wirbelablösung („vortex shedding“), welche orthogonal zur Windrichtung wirkende Kräfte verursacht. Im Vergleich zu bisherigen Ansätzen [19, 20] erfolgt hier die Übertragung der Kräfte auf das Gebäude über eine orthogonal zur Gebäudehülle fixierte, aber parallel bewegliche Prallscheibe einer Doppelfassade, wobei die bewegliche Prallscheibe durch das Gebäude angeregt wird (Abb: 6). Vorteilhaft ist hier unter anderem eine deutlich einfachere konstruktive Anbindung der beweglichen Prallscheibe [21, 22]. Zugrunde gelegt wird, dass die beweglichen Prallscheiben geschossweise je Seite gekoppelt sind und sich im Eckbereich in einen feststehenden Fassadenteil schieben können.

Die in Abb. 6 (Schnitt B–B, dunkelgrün) dargestellte bewegliche Prallscheibe ist über Federelemente, die auf die dominierende erste Eigenfrequenz des Gebäudes abgestimmt sind, sowie über leichtgängige Führungsschienen mit der feststehenden Fassade verbunden. Eine vertikale Verbindung der Prallscheiben über zwei oder mehr Geschosse ist möglich und erlaubt die Einsparung mechatronischer Komponenten. Für die Realisierung verschiedener geschossabhängiger Dämpfungskoeffizienten und einer zeitlich veränderlichen Dämpfung wurde ein mechatronischer Schwingungsdämpfer inklusive Energie-Harvester entwickelt. Kernelement ist ein Schrittmotor, der als Generator fungiert. Durch die Entwicklung einer spezifischen Leistungselektronik kann ein definierter mechanischer Dämpfungskoeffizient gewährleistet und Energie in einer Batterie gespeichert werden. Über einen Bewegungswandler wird die Relativbewegung zwischen Geschoss und beweglicher Prallscheibe auf den Generator übertragen.

3.3 Modellbildung, Simulation und Regelung

Zur simulativen Untersuchung im Vorfeld einer Umsetzung sowie zum Vergleich unserer Ergebnisse mit anderen Ansätzen wurde ein 306 m hohes Benchmark-Gebäude mit 76 Stockwerken betrachtet, für das ein Starrkörper- und Windlastmodell vorliegt [23, 24]. Dieses wurde um bewegliche Prallscheiben in den obersten Stockwerken erweitert, wobei auch in der Praxis auftretende Rollreibung in den Führungsschienen sowie viskose Reibung und Haftreibung im Generator berücksichtigt wurden. Im Rahmen einer multikriteriellen Optimierung mittels genetischer Algorithmen wurden die Anzahl von Stockwerken mit beweglicher Doppelfassade (Prallscheibe) und deren Dämpfungsparameter für die Anbindung bestimmt [22]. Hierbei wurden zunächst zwei Ansätze verfolgt: eine passive Schwingungsdämpfung und eine semi-aktive in Form einer geschwindigkeitsbasierten Ground-Hook-Regelung, bei der zwischen zwei Dämpfungsgraden in Abhängigkeit von der Relativbewegung zwischen beweglicher Prallscheibe und Gebäude umgeschaltet wird. Für eine Windgeschwindigkeit von 13,5 m/s in 10 m Höhe (10-Jahres-Periode) wurden der Betrag der maximalen Beschleunigung des obersten Stockwerks

und die maximale Relativbewegung der Prallscheibe minimiert. Anhand der daraus resultierenden Pareto-Fronten wurden Parametersätze für beide Dämpfungsansätze mit beweglichen Doppelfassaden in den obersten 20 Stockwerken ausgewählt. Da eine größere Fassadenbewegung zu einer besseren Schwingungsreduktion führt, wurde beim passiven Ansatz ein Parametersatz gewählt, welcher zu der konstruktiv maximal erlaubten Relativbewegung (± 500 mm) führt.

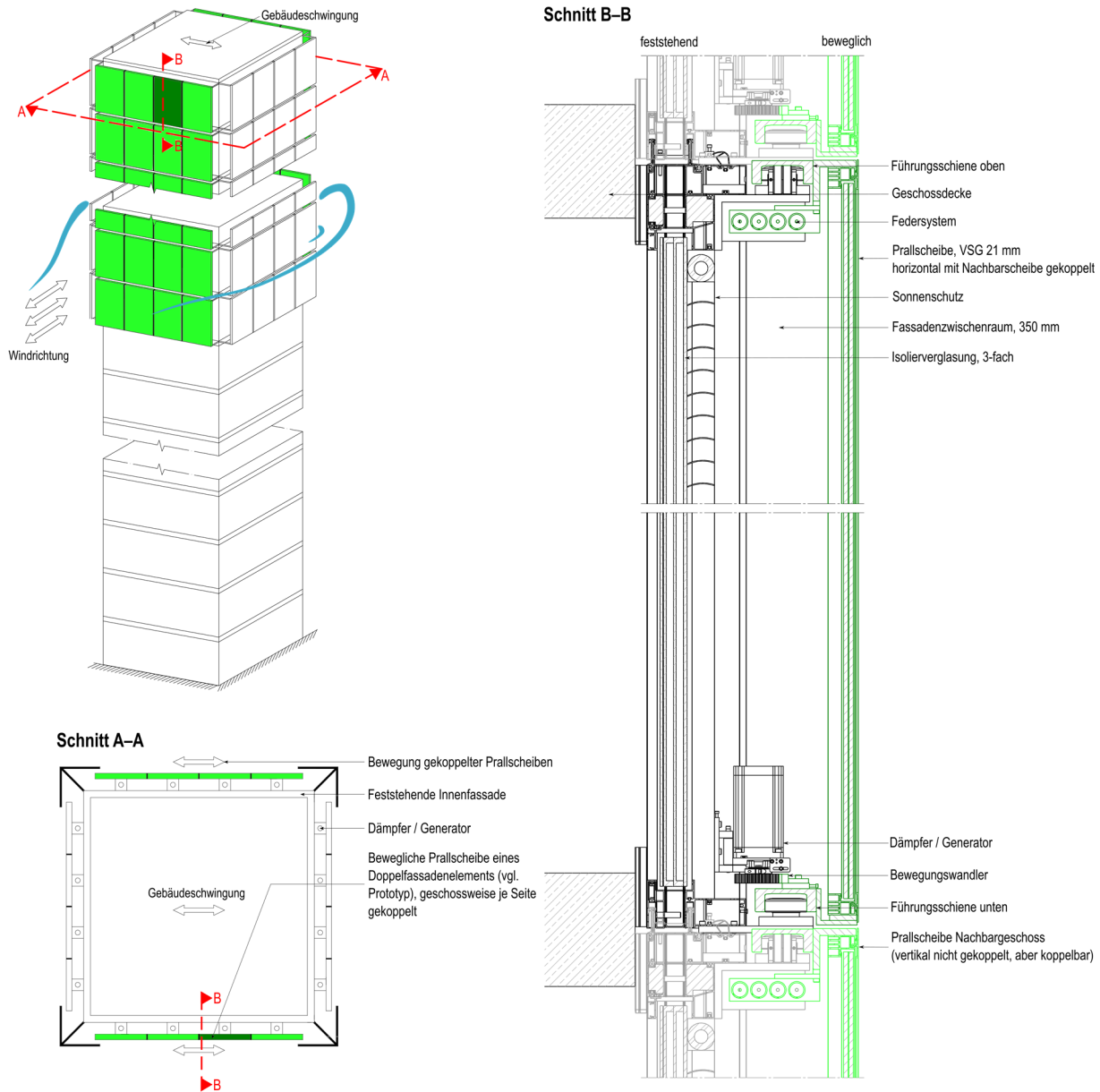


Abb. 6: Konzept und Aufbau des beweglichen Doppelfassadensystems

Die maximale Beschleunigungsamplitude im 76. Stockwerk konnte so um rund 28 % von 0,269 m/s² beim ungedämpften Gebäude mit feststehenden Prallscheiben auf 0,195 m/s² reduziert werden. Wählt man beim semiaktiven Ansatz einen Parametersatz mit gleicher maximaler Beschleunigungsamplitude, so kann die relative Fassadenbewegung um 34 % auf ± 330 mm reduziert werden. Größere Fassadenbewegungen beim semiaktiven Ansatz führen nur zu minimalen Verbesserungen in der Beschleunigungsreduktion. Die zeitlichen Verläufe der Beschleunigung und Fassadenbewegung für das ungedämpfte und das semiaktiv gedämpfte Gebäude sind in Abb. 7 dargestellt. Die Gebrauchstauglichkeit für eine Hotel- und Büronutzung ist damit gewährleistet [15, 25].

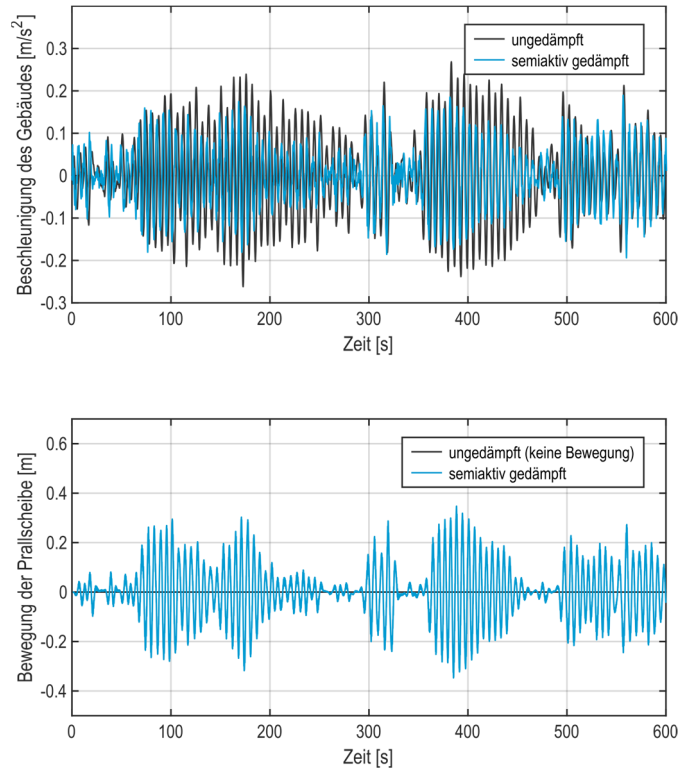


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Beschleunigung des Gebäudes und der Bewegung der Prallscheibe im 76. Stockwerk

3.4 Validierung am Fassadenprototyp

Um die Machbarkeit einer praktischen Umsetzung der Konzepte zu untersuchen, wurde ein Fassadenelement mit beweglicher Prallscheibe (Breite: 2,6 m; Höhe: 2,8 m) in Zusammenarbeit mit der Fima Josef Gartner GmbH konstruiert und aufgebaut (Abb. 8).



Abb. 8: Fassadenprototyp bestehend aus Basisrahmen, Gebäuderahmen und Doppelfassadenelement mit beweglicher Prallscheibe

Das Fassadenelement ist auf einem beweglichen Gebäuderahmen montiert. Abb. 9 zeigt den Generator für die Realisierung der semiaktiven Dämpfung und Energiegewinnung. Der Fassadenprototyp erlaubt die experimentelle Identifikation von parasitären Reibungswerten, welche in der zuvor beschriebenen Optimierung berücksichtigt sind.

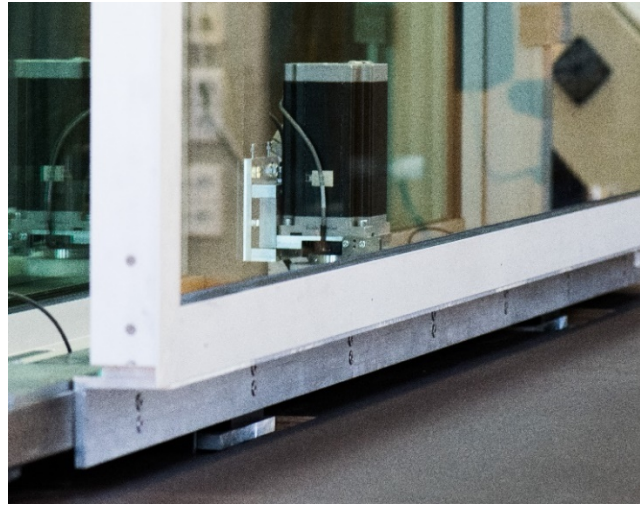


Abb. 9: Generator für semiaktive Dämpfung und Energiegewinnung

Die Funktionsweise des Fassadenelements wird in Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulationen untersucht (Abb. 10). Hierbei wird das gesamte Hochhaus bis auf ein herausgelöstes Fassadenelement, das durch den Fassadenprototyp ersetzt wird, mithilfe der Software MATLAB und Simulink simuliert.

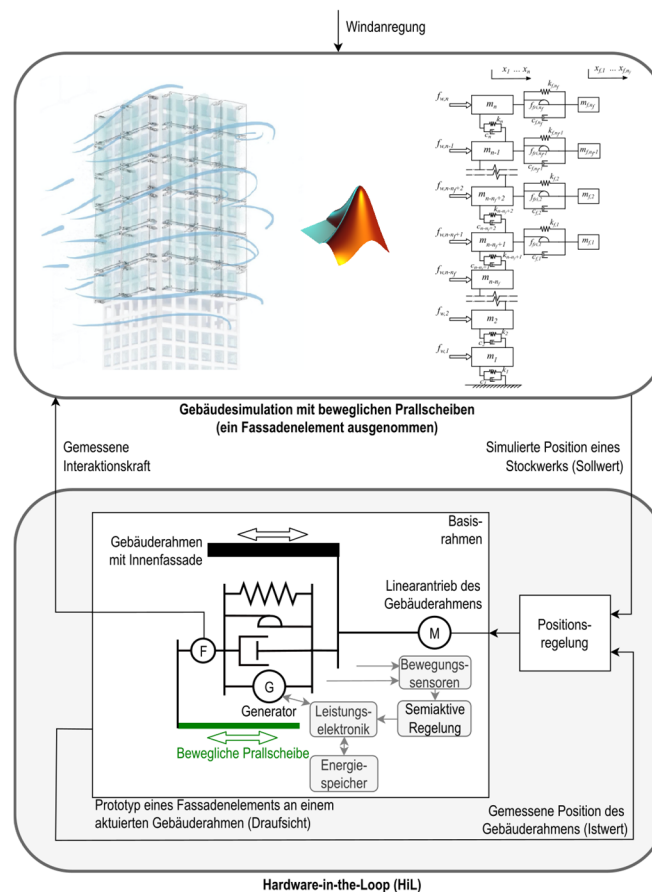


Abb. 10: Hardware-in-the-Loop Simulation

Die daraus resultierende Bewegung eines ausgewählten Stockwerks wird mittels eines geregelten Linearantriebs am Gebäuderahmen realisiert. Um die Rückwirkung der beweglichen Prallscheibe auf das Gebäude zu erfassen, wird die Interaktionskraft mittels eines Kraftsensors erfasst und in die Gebäudesimulation zurückgeführt.

Erste Untersuchungen zeigen, dass die geerntete elektrische Energie bei der betrachteten Windgeschwindigkeit von 13,5 m/s ausreicht, um das eingebettete System (Mikrocontroller, Sensoren und Leistungselektronik) aller Fassadenelemente in sämtlichen Stockwerken zu versorgen und die Batterie in jedem Fassadenelement zu laden. Der Wirkungsgrad in der Umwandlung von mechanisch dissipierter Energie in elektrische Energie im elektronisch-geregelten Dämpfer beträgt ca. 70 %. Abb. 11 zeigt die generierte elektrische Leistung für ein Fassadenelement im obersten Stockwerk. Aus ersten Versuchen konnte eine mittlere Leistung eines Elements von 2,8 W ermittelt werden, was deutlich über dem durchschnittlichen Verbrauch des eingebetteten Systems liegt und den autarken Betrieb des gesamten semiaktiven Dämpfungssystems erlaubt. Eine weitere Minimierung des Energieverbrauchs ist möglich, wenn mechanisch gekoppelte Fassadenelemente eine reduzierte Anzahl von Sensoren und Generatoren erfordern. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass eine bewegliche Prallscheibe mit sehr geringer Rollreibung von 0,002 realisiert werden kann und dass ein Schrittmotor für die präzise Realisierung von gewünschten Dämpfungen bei simultaner Energiegewinnung geeignet ist.

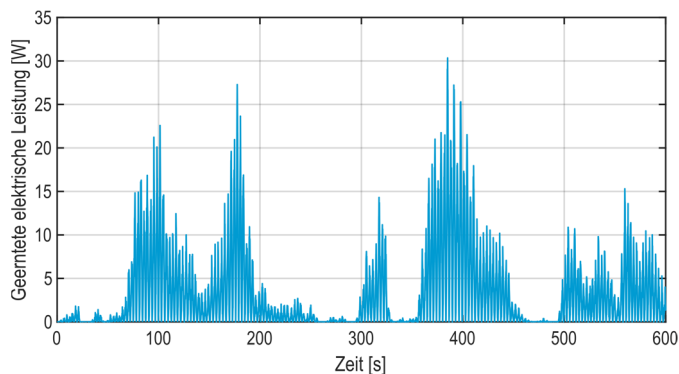


Abb. 11: Geerntete elektrische Leistung eines Fassadenelements im 76. Stockwerk

4. Multifunktionale hybride Konstruktionen

4.1 Motivation und Zielstellung

Multifunktionale Konstruktionen sind hinsichtlich des Einsparpotenzials von Ressourcen besonders reizvoll. Ausgeführt in Form von wandelbaren Überdachungen für Kultur- und Sportstätten oder als Fassadensysteme mit adaptiver Verschattung, übernehmen sie mehrere Aufgaben bei einfachem Ressourcenverbrauch, das heißt, es ist nur eine Konstruktion bzw. ein Gebäude für mehrere Funktionen notwendig. Die gesteigerte Funktionalität trägt zudem zur Erhöhung der Lebensqualität für Nutzerinnen und Nutzer bei.

Am Lehrstuhl Hybride Konstruktionen - Massivbau werden in diesem Forschungsschwerpunkt neue effiziente Lösungen für multifunktionale Konstruktionen erarbeitet. Ziel ist es, solche Konstruktionen stärker in das Bewusstsein zu rücken und als eine nachhaltige Alternative (Ressourceneinsparung bei Gewinn an Funktionalität) gegenüber herkömmlichen Konstruktionen aufzuzeigen. Die Anwendung von Leichtbauprinzipien zur Steigerung der Effizienz ist bei multifunktionalen Konstruktionen aus zweierlei Sicht von großer Bedeutung: zum einen zur grundsätzlichen Ressourceneinsparung, zum anderen zur Einsparung von Energie, die für den Betrieb der Konstruktion benötigt wird. Hierfür gilt, je kleiner die bewegte Masse, desto einfacher gestaltet sich die Transformation.

Die vorhandenen Grenzen des Leichtbaus können durch Integration aktiver Systeme aufgeweitet werden. Diese erlauben die gezielte Anpassung an statische Lasten sowie die aktive Beeinflussung der Systemantwort infolge dynamischer Belastungen, wodurch die Materialausnutzung weiter verbessert werden kann. Sie zeichnen sich durch (1) Sensorik zur Erfassung des aktuellen Bauwerkszustands, (2) Regelalgorithmen zur sensorbasierten Berechnung geeigneter Aktuatoreingriffe im Fall externer Störungen sowie (3) Aktuatorik zur Umsetzung der berechneten Eingriffe aus [26]. Multifunktionale Konstruktionen sind teilweise ohnehin mit diesen Komponenten ausgestattet, wodurch bei der Integration zusätzlicher aktiver Systeme Synergieeffekte ausgenutzt werden können.

4.2 Entwicklung eines aktiven hybriden Dachtragwerks

Das am Lehrstuhl entwickelte aktive hybride Dachtragwerk (Abb. 12a) kombiniert nachhaltig Leichtbau mit Multifunktionalität. Als Ergebnis mehrerer Vorarbeiten dient es als Untersuchungsobjekt und soll die Herausforderungen im Umgang mit multifunktionalen Konstruktionen aufzeigen. Zur Durchführung experimenteller Untersuchungen und zur Validierung entwickelter Methoden und Modelle wurde vor Kurzem ein Dachsegment als Demonstrator am Lehrstuhl realisiert (Abb. 12b und 13).

An den Entwurf des aktiven hybriden Dachtragwerks wurden die folgenden Anforderungen gestellt: (1) Wandelbarkeit basierend auf elastischer und Starrkörper-Transformation, (2) Lastabtrag über Prinzipien des Leichtbaus, wie beispielsweise den Kurzschluss von Kräften, (3) Adaption gegenüber zeitlich und örtlich veränderlichen statischen und dynamischen Lasten.

Das Dach besteht aus radial angeordneten Segmenten (Abb. 12a). Ein Segment setzt sich aus zwei oberen Flanken und einer unteren Flanke zusammen, wobei die Flanken mittels Spreizen gelenkig um die Querachse miteinander verbunden sind. Die Reaktionskräfte aus den oberen Flanken der einzelnen Dachsegmente werden über einen Druckring und die aus den unteren Flanken über einen Zugring kurzgeschlossen (Abb. 12b).

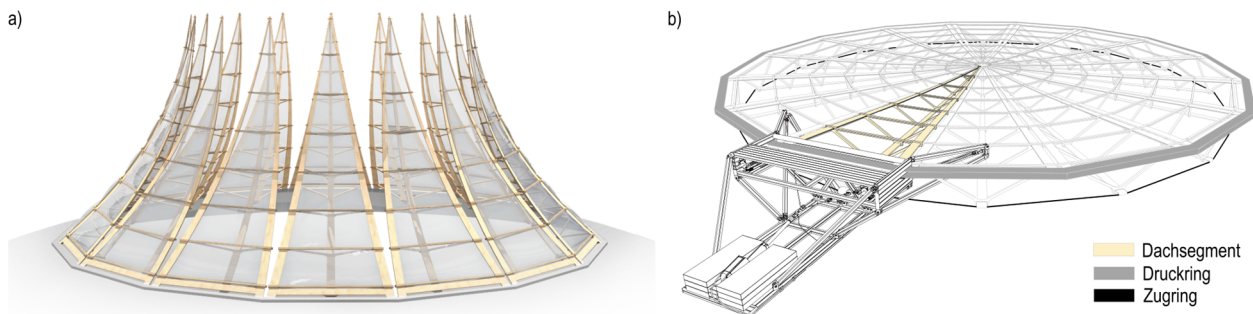


Abb. 12: a) Entwurf eines aktiven hybriden Dachtragwerks, b) Realisierung eines Dachsegments als Demonstrator

Das Konzept zur Transformation sieht eine Verkürzung des Zugrings vor, welche zur simultanen Öffnung aller Dachsegmente führt. Dafür muss das Seil des Zugrings an den Enden der unteren Flanken durchgleiten können (Abb. 14a). Um eine möglichst große Transformation zu erreichen, wird eine Starrkörper-Transformation mit einer elastischen Transformation kombiniert. Dafür werden die oberen Flanken gelenkig an den Druckring angeschlossen, wobei im geschlossenen und weit geöffneten Zustand mechanische Anschläge über ein Kräftepaar eine Einspannung generieren und folglich eine elastische Transformation ermöglichen. Die elastische Transformation der einzelnen Segmente nutzt dabei den Fin Ray Effekt® [27], bei dem bereits eine relativ kleine Auflagerverschiebung zu einer relativ großen Verschiebung der Spitze führt.

Das Konzept zur Adaption sieht für jedes Dachsegment in jedem Transformationszustand die Möglichkeit der aktiven Beeinflussung der Systemantwort infolge dynamischer und statischer Lasten vor. Die Umsetzung erfolgt durch im Druckring an den Auflagern der oberen Flanken integrierte kompakte, hochdynamische Lineardirektantriebe (Abb. 14b). Die horizontale Auflagerkraft wird von je zwei parallelen, symmetrisch um die Aktuatoren angeordneten Federn aufgenommen, sodass die Aktuatoren keine permanente statische Belastung erfahren und folglich effizient ausgelegt werden können.

Die Realisierung eines Dachsegments als Demonstrator ist in Abb. 13 dargestellt. Das Herauslösen eines einzelnen Segments lässt keinen Kurzschluss zu, weshalb eine im Vergleich zum Druck-Zug-Ring aufwendigere Konstruktion erforderlich wurde. Das Seil des Zugrings wird mittels Umlenkrollen an einen elektrischen Linearaktuator angeschlossen, der die Verkürzung des Seils und damit die Transformation des Dachsegments ermöglicht. Die vollständige Öffnung des Dachsegments ist bei einer Rotation der Spitze von rund 75° erreicht und durch die Biegetragfähigkeit der Flanken nach Erreichen des oberen mechanischen Anschlags begrenzt.



Abb. 13: Demonstrator in mehreren Transformationszuständen von geschlossen bis vollständig geöffnet

Die Flanken des Dachsegments bestehen aus dem Furnierschichtholz BauBuche der Pollmeier Massivholz GmbH, welches sich als hochfestes Holz mit großem Verhältnis von Festigkeit zu Steifigkeit sowie geringer Wichte für die Realisierung multifunktionaler Strukturen basierend auf elastischer Transformation gut eignet. Die dreiecksförmigen Spreizen aus Birkensperrholz wurden mittels CNC-Fräse aus einem Stück gefertigt. Die Dimension des Demonstrators wurde maßgeblich durch den verfügbaren Laborraum begrenzt. Die konisch zulaufenden Flanken haben

eine Länge von rund 4 m bei einer konstanten Höhe von nur 12,5 mm. Der Abstand der oberen Flanken am Auflager beträgt rund 1,5 m, der Abstand zur unteren Flanke 0,5 m. Die Hülle besteht aus einem für die Transformation verträglichen integrierten PVC-Mehrkammer-Folienkissen.

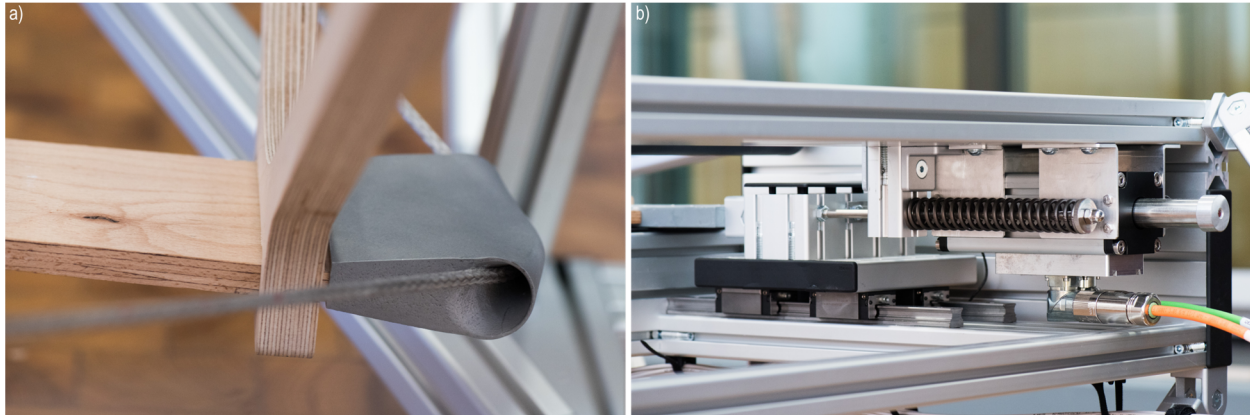


Abb. 14: a) Umlenkung des Seils an der unteren Flanke über ein 3-D-Druckdetail, welches das Durchgleiten des Seils erlaubt, b) in den Druckring integrierte Lineardirektantriebe zur statischen und dynamischen Adaption sowie Federn zur Aufnahme der Horizontalkräfte aus den oberen Flanken

4.3 Untersuchungsmethodik

Multifunktionale Konstruktionen bringen gegenüber herkömmlichen Konstruktionen eine Reihe besonderer Herausforderungen mit sich. Für alle möglichen Zustände, die solche Konstruktionen annehmen können, müssen Sensoren und insbesondere Aktuatoren in geeigneter Weise platziert werden. Ziel ist, die Kosten für Aktuatoren durch Minimierung der Anzahl sowie durch energieeffiziente Platzierung gering zu halten. Dafür werden Optimierungsalgorithmen mit Gütekriterien zur Berücksichtigung der Anzahl und Energieeffizienz verwendet [28]. Basierend auf diesen Untersuchungen konnte die Platzierung der Aktuatorik beim Entwurf des aktiven hybriden Dachtragwerks vorgenommen werden.

Das Mess- und Aktuierungskonzept sowie das Transformations- und Regelungskonzept am Demonstrator sind in Abb. 15 dargestellt. Die Aktuatorstellgröße u_1 ermöglicht die Transformation, die Stellgrößen der Lineardirektantriebe u_{21} und u_{22} unterdrücken statische und dynamische Störungen $w(t)$, deren Wirkung mittels Dehnungsmessstreifen S_{1-6} und Inertialsensoren I_{1-3} erfasst wird. Aufgabe der Regelalgorithmen zur Transformation und Adaption ist es, Stellgrößen $u(t)$ derart vorzugeben, dass die in $y(t)$ zusammengefassten Messgrößen möglichst gut mit den Führungsgrößen $r(t)$ übereinstimmen und der Regelfehler $e(t)$ verschwindet.

Eine Herausforderung hierbei ist die Auslegung der Regelalgorithmen zur dynamischen Adaption, welche eine reduzierte modelltechnische Beschreibung des dynamischen Strukturverhaltens erfordert. Dieses ist bei multifunktionalen Strukturen zustandsabhängig, bedingt durch sich ändernde (1) Auflagerbedingungen, (2) Massenverteilung sowie (3) geometrische Steifigkeit. Die klassischen linearen zeitinvarianten (LZI) Modelle sind nicht in der Lage, dieses Verhalten global zu beschreiben, stattdessen werden lineare parameterveränderliche (LPV) Modelle verwendet [29]. Diese können in zwei Schritten auf der Basis numerischer Modelle hergeleitet werden. Zunächst werden für diskrete Transformationszustände reduzierte LZI-Modelle abgeleitet, welche die Strukturmechanik lokal beschreiben. Anschließend wird parameterabhängig zwischen den lokalen LZI-Modellen interpoliert, um das globale Verhalten in Form eines LPV-Modells abzubilden. Dafür wird der veränderliche Parameter so gewählt, dass er ein Maß der aktuellen Transformation darstellt (bspw. Auflagerverschiebung oder -rotation). Für eine dem Demonstrator ähnliche, ebene Struktur wurde ein LPV-Modell in dieser Weise hergeleitet und durch nichtlineare

transiente Simulationen mit dem zugrundeliegenden numerischen Modell validiert [30]. Darauf aufbauend konnten Regler zur dynamischen Adaption während der Transformation sowie in diskreten Transformationszuständen entworfen und simulativ validiert werden [31, 32].

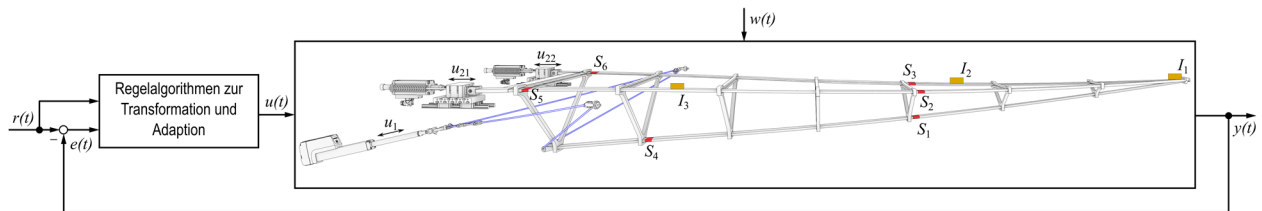


Abb. 15: Mess-, Regelungs-, Aktuierungs- und Transformationskonzept am Demonstrator

4.4 Validierung am Demonstrator

Zur Verdeutlichung der zuvor beschriebenen zustandsabhängigen Strukturdynamik multifunktionaler Strukturen sind im Folgenden die Ergebnisse erster dynamischer Experimente sowie ein erster Vergleich mit einem numerischen Modell dargestellt.

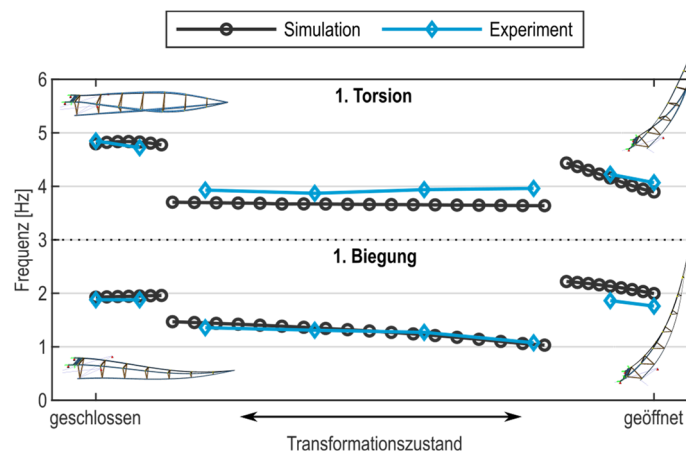


Abb. 16: Verlauf der Eigenfrequenzen der ersten Biege- und der ersten Torsionseigenform über der Transformation

Die numerischen und experimentellen Ergebnisse in Abb. 16 zeigen den Verlauf der Eigenfrequenzen der ersten Biege- und der ersten Torsionseigenform über der Transformation. Die experimentellen Ergebnisse wurden anhand von Ausschwingversuchen ermittelt, für welche die Holzstruktur zunächst per Hand in die entsprechende Biege- bzw. Torsionseigenform ausgelenkt wurde. Die daraus resultierende Strukturantwort wurde in Form von Beschleunigungen und Drehraten mittels der drei Inertialsensoren aufgenommen. Die Simulationsergebnisse konnten durch die Modalanalyse eines numerischen Modells mithilfe der Software SOFiSTiK generiert werden. In Simulation und Experiment ist ein unstetiger Verlauf der Eigenfrequenzen, bedingt durch die sich ändernden Lagerbedingungen, erkennbar. Die als Einspannung wirkende Lagerung im Bereich des geschlossenen und weit geöffneten Transformationszustands führt zu sichtbar größeren Eigenfrequenzen als die gelenkige Lagerung im mittleren Bereich. Innerhalb der einzelnen Bereiche sind ebenfalls Änderungen der Eigenfrequenzen sichtbar. Im mittleren Bereich (Starrkörper-Transformation durch gelenkige Lagerung) sind diese Änderungen primär bedingt durch eine Änderung der Massenverteilung, in den äußeren Bereichen (elastische Transformation durch Einspannung) durch eine Änderung der geometrischen Steifigkeit. Die am Demonstrator experimentell ermittelten Ergebnisse bestätigen die numerisch bestimmten Verläufe, sie veranschaulichen die Herausforderungen im Umgang mit multifunktionalen Konstruktionen und motivieren den Einsatz und die Weiterentwicklung zuvor beschriebener Untersuchungsmethoden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Forschungsprojekte zeigen ein breites Spektrum hybrider Konstruktionsansätze auf der Grundlage des Leichtbaus. Die Nutzung nachwachsender und rezyklierter Rohstoffe im vorgestellten Holz-Beton-Verbundrahmensystem mit robustem, biegetragfähigem Knoten in Verbindung mit einem hohen Grad an Vorfertigung ermöglicht effizientes und nachhaltiges Bauen im Hochhausbau. Am Beispiel des semiaktiven Doppelfassadensystems mit Energiegewinnung zur Schwingungsdämpfung bei Hochhäusern wurde gezeigt, dass die gezielte Integration aktiver Technologien Einsparungen von Ressourcen bei autarkem Betrieb ermöglichen. Das am Lehrstuhl entworfene aktive hybride Dachtragwerk zeigt die Herausforderungen im Umgang mit sehr leichten multifunktionalen Konstruktionen auf, die relativ großes Potenzial für Ressourceneinsparungen bei gleichzeitig gesteigertem Komfort für Nutzerinnen und Nutzer bieten.

Das gemeinsame Ziel der vorgestellten Forschungsprojekte ist das Finden und Aufzeigen von Lösungen für ein ressourcenschonendes und klimaneutrales Bauen in der Zukunft. Auf dem Weg dorthin ist noch viel Forschungs-, Entwicklungs- und Aufklärungsarbeit notwendig. Insbesondere ist es wichtig, vielversprechende Ansätze und Methoden frühzeitig in die Lehre einzubinden.

Detaillierte Informationen zu den Forschungsprojekten sind in weiteren Publikationen auf der Homepage des Lehrstuhls zu finden (<https://www.b-tu.de/fg-hybride-konstruktionen-massivbau>).

Referenzen

1. Bleicher, A. [Hrsg.] (2018) Hybride Konstruktionen: 25. Brandenburgischer Bauingenieurtag BBIT 2018. BTU Cottbus-Senftenberg.
2. Beckmann, B. et al. (2021) Standortübergreifende Forschung zu Carbonbetonstrukturen im SFB/TRR 280. Bautechnik 98, H. 3, S. 232–242.
3. Stroetmann, R.; Podgorski, C. (2014) Zur Nachhaltigkeit von Stahl- und Verbundkonstruktionen bei Büro- und Verwaltungsgebäuden, Teil 1: Tragkonstruktionen. Stahlbau 83, H. 4, S. 245–256.
4. Schlaich, J.; Wagner, R. (1988) Hybride Tragwerke $1 + 1 = 3$, Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Baukultur 6, S. 27–29.
5. Spencer, B. F.; Nagarajaiah, S. (2003) State of the Art of Structural Control. Journal of Structural Engineering 129, H. 7, S. 845–856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:7\(845\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845))
6. Sobek, W. et al. (2021) Adaptive Hüllen und Strukturen. Bautechnik 98, H. 3, S. 208–221. <https://doi.org/10.1002/bate.202000107>
7. Körner, A. et al. (2021) Integrative design and fabrication methodology for bio-inspired folding mechanisms for architectural applications. Computer-Aided Design 133, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2020.102988>
8. Bleicher, A.; Schlaich, M.; Fujino, Y.; Schauer, T. (2011) Model-based design and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators. Engineering Structures 33, no. 8, pp. 2237–2247. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.035>
9. Schlaich, M.; Hückler, A. (2017) Infraleichtbeton: Reif für die Praxis. Beton- und Stahlbetonbau 112, H. 12, S. 772–783. <https://doi.org/10.1002/best.201700046>
10. Schlaich, M.; Bleicher, A.; Pasternak, H. (2014) Der Porsche Pavillon in Monocoque-Bauweise. Bauingenieur 89, H. 1, S. 1–10.

11. Göppert, K. (2005) Adaptive Tragwerke – Wandelbare Dachkonstruktionen für Sportbauten. Bautechnik 82, H. 3, S. 157–161. <https://doi.org/10.1002/bate.200590057>
12. Kaltenbach, F. (2019) Holz Höher Hybrid. DETAIL – Zeitschrift für Architektur + Baudetail, H. 10, S. 28-33.
13. Baker, W.; R. Horos, D.; M. Johnson, B.; Schultz, J. (2014) Timber Tower Research: Concrete Jointed Timber Frame. Structures Congress, Boston, pp. 1255–1266.
14. Kaufmann, H.; Krötsch, S.; Winter, S. (2017) Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. DE-TAIL – Zeitschrift für Architektur + Baudetail. <https://doi.org/10.11129/9783955533540>
15. Sarkisian, M. P. (2016) Designing tall buildings: Structure as architecture. Second edition. New York: Routledge, Taylor & Francis Group.
16. Höltke, T.; Bleicher, A. (2019) Timber-concrete composite frame joint for high-rise buildings. IABSE Congress – The Evolving Metropolis, New York City, pp. 1137–1141.
17. Kuhlmann, U.; Gauß, J. (2019) Optimierung und Systematisierung von Anschlüssen im Holzbau zur Verbreitung der ressourcenschonenden Bauweise. Abschlussbericht F 3185, Forschungsinitiative Zukunft Bau.
18. Weller, B.; Fahrion, M.-S.; Horn, S.; Pfuhl, A.-M. (2014) Doppelfassaden im Zeichen des Klimawandels. Bauphysik 36, H. 2, S. 68–73. <https://doi.org/10.1002/bapi.201410018>
19. Moon, K. S. (2016) Integrated damping systems for tall buildings: Tuned mass damper/double skin facade damping interaction system. The Structural Design of Tall and Special Buildings 25, no. 5, pp. 232–244. <https://doi.org/10.1002/tal.1237>
20. Fu Tat S.; Zhang R. (2016) Integrating Double-Skin Façades and Mass Dampers for Structural Safety and Energy Efficiency. Journal of Architectural Engineering 22, no. 4, pp. 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000218)
21. Zhang, Y; Schauer, T.; Wernicke, L.; Wulff, W.; Bleicher, A. (2020) Facade-Integrated Semi-Active Vibration Control for Wind-Excited Super-Slender Tall Buildings. IFAC-PapersOnLine 53, no. 2, pp. 8395–8400. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1585>
22. Zhang, Y; Schauer, T.; Wernicke, L.; Vrontos, A.; Engelmann, M.; Wulff, W.; Bleicher, A. (2021) Design of Moveable Facade Elements for Energy Harvesting and Vibration Control of Super Slender Tall Buildings under Wind Excitation. POW-ERSKIN Conference Proceedings, pp. 327–338.
23. Yang, J. N.; Agrawal, A. K.; Samali, B.; Wu, J.-C. (2004) Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings. Journal of Engineering Mechanics 130, no. 4, pp. 437–446. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:4\(437\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(437))
24. Samali, B.; Kwok, K. C. S.; Wood, G. S.; Yang, J. N. (2004) Wind Tunnel Tests for Wind-Excited Benchmark Building. Journal of Engineering Mechanics 130, no. 4, pp. 447–450. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:4\(447\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:4(447))
25. Richtlinie VDI 2038 Blatt 2 (2013) Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken bei dynamischen Einwirkungen – Untersuchungsmethoden und Beurteilungsverfahren der Baudynamik – Schwingungen und Erschütterungen – Prognose, Messung, Beurteilung und Minderung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.
26. Soong, T. T. (1990) Active Structural Control: Theory and Practice: Theory and Applications. Essex: Longman Scientific & Technical.
27. Bögle, A.; Hartz, C.; Schlaich, M. (2012) Flexible Structures – A Parametrical Analysis of the Fin Ray. IASS Annual Symposium: IASS-APCS, pp. 214–215.

28. Marker, P.; Stammen, L.; Bleicher, A. (2019) Energy-efficient actuator placement for a convertible bending-active structure. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019 – Form and Force, pp. 1717–1724.
29. Mohammadpour, J.; Scherer, C. W. [eds.] (2012) Control of Linear Parameter Varying Systems with Applications. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1833-7>
30. Jirasek, R.; Schauer, T.; Bleicher, A. (2019) Linear Parameter-Varying Models for Convertible Structures in Civil and Structural Engineering. IFAC-PapersOnLine 52, no. 15, pp. 555–560. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.734>
31. Jirasek, R.; Schauer, T.; Bleicher, A. (2019) Active Vibration Control of a Convertible Structure based on a Linear Parameter-Varying Model. IFAC-PapersOnLine 52, no. 28, pp. 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.375>
32. Jirasek, R.; Schauer, T.; Bleicher, A. (2020) Active Vibration Control of a Convertible Structure based on a Polytopic LPV Model Representation. IFAC-PapersOnLine 53, no. 2, pp. 8389–8394. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1590>

Hybride Konstruktionen mit DELTABEAM®



DELTABEAM® Green besteht zu **mehr als 90 % aus recyceltem Stahl und minimiert den Materialverbrauch** im Vergleich zu herkömmlichen Stahlkonstruktionen. Das System ist voll kompatibel mit LEED, BREEAM und EPD und sorgt für eine **deutlich bessere Bewertung Ihres Bauprojekts**.



Brandschutz integriert



CO₂-Äquivalent reduziert



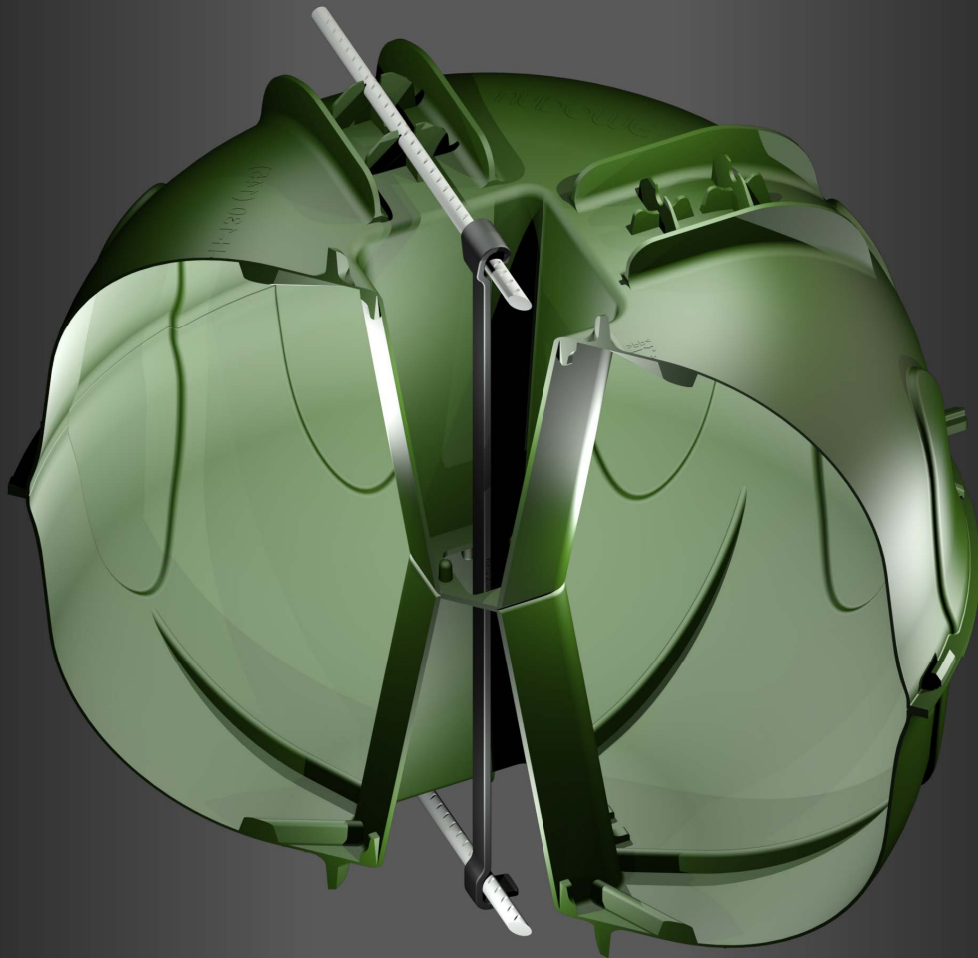
Nutzung optimiert



Flexibilität fokussiert

UNIDOME

NACHHALTIGE UND MATERIALEFFIZIENTE
BETONDECKEN



Unidome Deutschland GmbH

Große Hub 10a
65344 Eltville Martinsthal
Tel.: 0049 6123 795 8933
office@unidome.de

www.unidome.de

Die Strukturen der Zukunft: leicht, adaptiv, kreislauffähig

Prof. Dr.-Ing. M.Arch. Lucio Blandini

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)
Universität Stuttgart
lucio.blandini@ilek.uni-stuttgart.de

Leichtbauansätze werden im Bauwesen traditionell dort eingesetzt, wo große Spannweiten überbrückt oder besondere Höhen erreicht werden müssen. Darüber hinaus ist Leichtbau in der Architektur an der Universität Stuttgart eng mit Fragen des Entwerfens verbunden gewesen. Persönlichkeiten wie Frei Otto, Jörg Schlaich und Werner Sobek haben die Forschungen des ILEK seit den 1960er Jahren richtungsweisend geprägt.

Heute ist leicht zu bauen eine ökologische Notwendigkeit geworden. Angesichts des durch das Bauwesens verursachten Ressourcenverbrauchs (weltweit über 60 %), der Treibhausgasemissionen (über 50 %) und des Abfallaufkommens (über 50 %) [1], müssen alle Beteiligten Verantwortung übernehmen. Die Reduktion des Gewichts einer Struktur (Klassischer Leichtbau) ist nach wie vor von großer Bedeutung. Es geht darüber hinaus aber auch um die Reduktion des ökologischen Fußabdrucks, der durch unsere gebaute Umwelt verursacht wird. Diese ganzheitliche Betrachtung wird vom Autor als Erweiterter Leichtbau bezeichnet. Die aktuelle Forschung des Instituts richtet sich an dieser Vorgabe aus.

Im Rahmen des SFB 1244 untersuchen wir zusammen mit 15 anderen Instituten das Potenzial adaptiver Technologien für eine deutliche Reduktion von Ressourcenverbrauch und klimaschädliche Emissionen [2]. Eine aktive Manipulation der Geometrie und des Tragwerkverhaltens ermöglicht es, Spannungsverteilungen zu optimieren, Verformungen zu reduzieren und Schwingungen zu dämpfen. Zur Verifizierung der gesammelten Erkenntnisse wurde auf dem Universitätscampus in Stuttgart-Vaihingen Anfang 2021 der Demonstrator D1244 errichtet – das weltweit erste adaptive Hochhaus [3].



Abb. 1: Demonstrator D1244 auf dem Campus Vaihingen (© René Müller)

Das ca. 36,5 m hohe Gebäude dient als multifunktionale Experimentalplattform im Bereich des Tragwerks und der Fassade. Durch die Integration von 24 aktiven Elementen in die Tragstruktur

erkennt das D1244 dank seiner Sensorik in Sekundenbruchteilen die Kräfte, die auf das Gebäude einwirken – und kann ihnen mit Hilfe seiner Regelungstechnik gezielt entgegenwirken. Die Sensoren erfassen auftretende Verformungen, und die im Gebäude verbauten Hydraulikaktoren erzeugen daraufhin gezielt eine Gegenkraft. Diese dient der Dämpfung von Schwingungen und verhindert Verformungen.

Zurzeit werden die Fassade des D1244, die aktuell aus einer einlagigen, rezyklierten Membrane besteht, nach und nach durch adaptive Hüllelemente ersetzt. Diese neuen Fassadenelemente können zum Beispiel den Licht- und Energieeintrag in das Gebäude, den Luftaustausch, sowie den Wärmedurchgang aktiv beeinflussen. Zudem werden bauphysikalische und komfortbezogene Anforderungen an das Innere des Gebäudes mit stadtraumbezogenen Funktionalitäten wie Regenwasser- und Temperaturmanagement kombiniert. Adaptive Hüllkonzepte eröffnen somit ein völlig neuartiges Funktionsspektrum im Fassadenbereich. Am D1244 wird zudem gezeigt, wie durch eine Kombination von Wiederverwendung und Recycling das Abfallaufkommen im Bauwesen deutlich reduziert werden kann.



Abb. 2: D1244: technischen Komponenten zur Aktuierung von Stützen und Aussteifungen (© Uli Regenscheit)

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt des ILEK liegt im Bereich der mineralischen Baustoffe. So wurde beispielweise in Zusammenarbeit mit dem ISW der Universität Stuttgart (Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen) ein Pulverbettverfahren mit wasserlöslicher Sandschalung entwickelt, mit dem filigrane, statisch optimierte Strukturen abfallfrei hergestellt werden können. Als Demonstrator wurde der Marinaressa Coral Tree entworfen und in Rahmen der Architektur-Biennale 2023 ausgestellt (s. Abb. 3). Die filigrane Konstruktion ist eine Neu-Interpretation des traditionellen Übergangs von der Decke zur Stütze, bei dem die Lasten von der horizontalen Decke über das Kapitell auf die Säulen übertragen werden [4].

Durch die optimale Verteilung des Materials entsprechend dem Spannungsverlauf konnte der Materialverbrauch im Vergleich zu herkömmlichen Strukturen um 60 Prozent reduziert werden - bei gleicher Tragfähigkeit. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie: Die entstehenden Bauteile

haben eine deutlich größere Oberfläche als massive Bauteile, so dass über die Zeit deutlich mehr CO₂ durch Karbonatisierung gebunden werden kann.

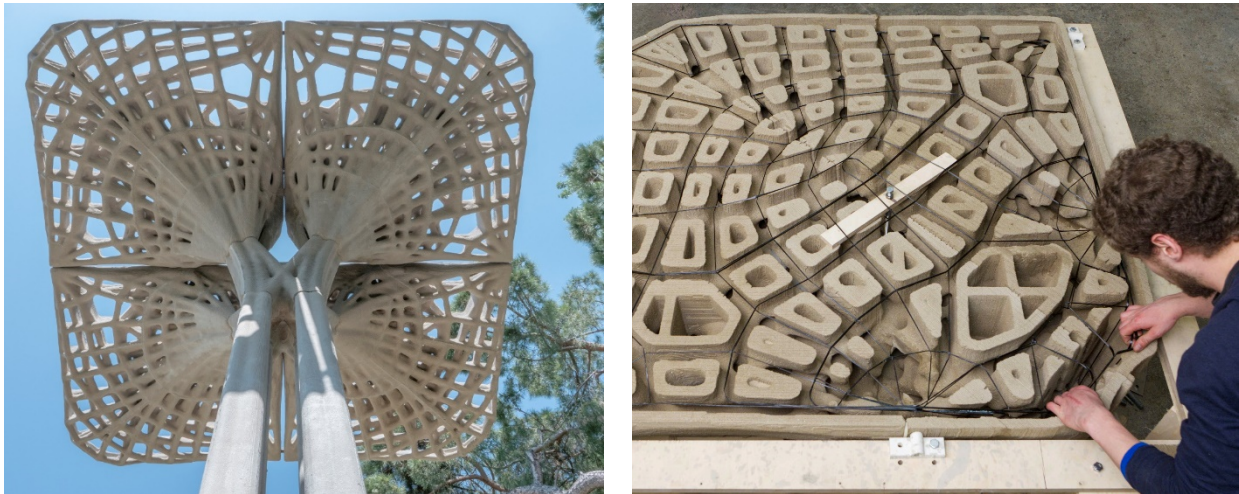


Abb. 3: Marinaressa Coral Tree. Links: Der Prototyp auf der Architekturbiennale Venedig 2023 (Daria Kovaleva / ILEK) .
Rechts: Zusammenbau der Schalungssegmente und Verlegung der Bewehrung vor dem Betonieren (© Onno Wegener / ISW)

Auf der Materialebene [5] untersuchen wir biobasierte Bindemittel, die Zement ersetzen können (mikrobiologisch induzierte Calcit ausfällung). Bei der Herstellung von Portlandzement fallen durch die Umwandlung von Calciumcarbonat (CaCO₃) zu Calciumoxid (CaO) stets prozessbedingte CO₂-Emissionen an. Die Biomineralisation erfolgt durch mikrobiologisch induzierte Calcit ausfällung (eng. kurz MICP) und ermöglicht hingegen die Fixierung von CO₂ in Form von CaCO₃-Kristallen, die Gesteinskörnung binden können. Das resultierende mineralische Material ähnelt in seiner chemischen Zusammensetzung karbonatisch zementiertem Sandstein und in der Formgebung zementgebundenem Beton, weswegen es als Biobeton bezeichnet wird. So sollen die CO₂-Emissionen, die prozessbedingt bei der Betonherstellung anfallen, deutlich reduziert werden.

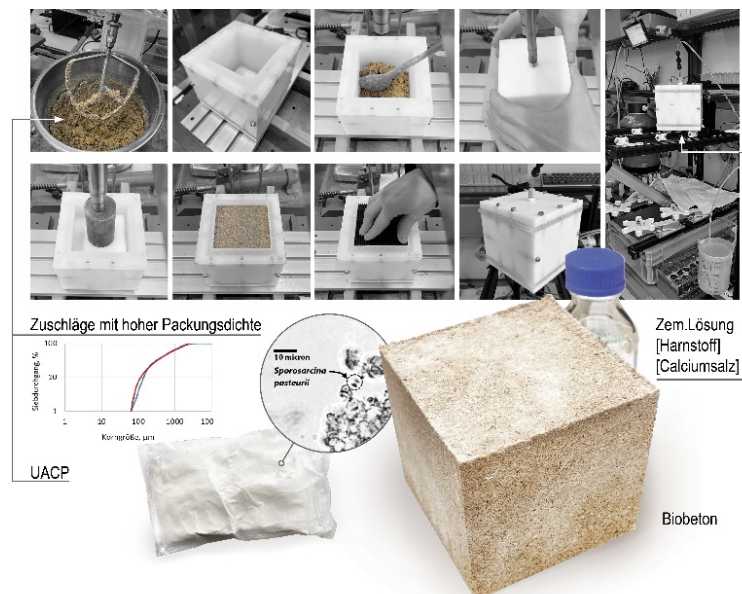


Abb. 4: Biobetonherstellung mit hoher Druckfestigkeit und Zementierungstiefe (ILEK)

Zusammenfassung

Die Bedeutung des Leichtbaus für das Bauwesen ist heute größer denn je. Wir müssen hierbei aber unseren Blickwinkel erweitern: Es geht nicht nur um eine Reduktion der Masse, sondern des gesamten ökologischen Fußabdrucks. Digitale Technologien bei Planung, Fertigung, Betrieb und Rückbau sowie die Tradition der interdisziplinären Zusammenarbeit an der Universität Stuttgart können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, um die Transformation des Bauens hin zu mehr Ressourcen- und Umweltschutz maßgeblich zu unterstützen.

Referenzen

1. W. Sobek: non nobis – über das Bauen in der Zukunft: Band 1: Ausgehen muss man von dem, was ist. Stuttgart, avedition, 2022.
2. W. Sobek, O. Sawodny, M. Bischoff, L. Blandini, et al., „Adaptive Hüllen und Strukturen: aus den Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 1244“, Bautechnik, Bd. 98, Nr. 3, S. 208-221, 2021, doi: 10.1002/bate.202000107.
3. L. Blandini, W. Haase, S. Weidner, M. Böhm, et al., „Der Demonstrator D1244: das weltweit erste adaptive Hochhaus“, Bautechnik, Bd. 99, Nr. 6, S. 452-462, 2022, doi: 10.1002/bate.202100065.
4. D. Kovaleva L. Blandini, Marinaressa Coral Tree in Sustainable Architecture & Design 2023 / 2024, ed. A. Herold und T. Kammer, avedition 2023.
5. L. Blandini, D. Kovaleva, C. Nething, D. Nigl, M. Smirnova et al., „Leicht bauen mit Beton – ausgewählte Forschungsarbeiten des ILEK – Teil 1: Materialleichtbau“, Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 118, Nr. 5, S. 310-319, 2023, doi: 10.1002/best.202300025.

Du willst Kosten
niedrig halten und
das Klima schützen?

xella

DÄMM RIGHT



Weniger CO₂-Ausstoß, niedrigerer Energieverbrauch, geringere Kosten und ganzjährig angenehme Temperaturen. Es gibt viele Gründe, warum eine Immobilie gedämmt werden sollte.

Multipor Mineraldämmsysteme sind die Antwort auf ökologisches, nachhaltiges Dämmen und Sanieren und überzeugen mit hervorragenden Produkteigenschaften:

- Mineralisch und massiv
- Hoch wärmedämmend mit bis zu $\lambda = 0,042 \text{ W}/(\text{mK})$
- Nicht brennbar
- Diffusionsoffen und kapillaraktiv
- Druckfest, formstabil und stauchungsfrei
- Frei von Schadstoffen und Fasern
- Schnell und einfach zu verarbeiten
- Europäisch zugelassen

Multipor ist ausgezeichnet:



multipor

BIM, EUROCODE

UND VOB SIND

IHRE WELT?

ONLINE MARKETING,

WEBDESIGN UND

SEO SIND MEINE.

ICH MACHE SIE ONLINE SICHTBAR

BERATUNG – WEBSITES – SOCIAL MEDIA

WWW.FRANZISKA-HAIN.DE

SCAN ME



Zur Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken nach DIN CEN/TS 19103 und geplantem Nationalen Anhang

Prof. Dr.-Ing. habil. Jörg Schänzlin

Hochschule Biberach, Institut für Holzbau
schaenzlin@hochschule-bc.de

1 Allgemeines

Bei der Holz-Beton-Verbundbauweise werden die Vorteile des Holzbaus mit den Vorteilen des Stahlbetonbaus verbunden. So werden im Vergleich zum Holzbau die Steifigkeit und die Tragfähigkeit erhöht und der Brand- und Schallschutz verbessert (siehe [1]). Auch lässt sich durch die Betonplatte eine aussteifende Scheibe auf einfache Art und Weise realisieren. Im Vergleich zum Stahlbetonbau wird das Eigengewicht reduziert und der Anteil von nachwachsenden Rohstoffen deutlich vergrößert. Hinzu kommt, dass im Hochbau bei sichtbaren Holzdecken oft kein weiterer Ausbau notwendig wird. Auch im Hinblick auf die Herstellung der Decken können einige Vorteile wie z.B. geringere einzubringende Betonmenge oder einen geringeren Anteil an Unterstützungsträgern durch die höhere Tragfähigkeit der Holzelemente im Vergleich zu Halbfertigteilplatten genutzt werden. Um diese Vorteile nutzen zu können, sind Berechnungsvorschriften für diese Bauteile zu entwickeln. Daher wurde [2] als Technical Specification erstellt und im Februar 2022 veröffentlicht. Sie kann auf europäischer Ebene als einen möglichen Vorschlag zur Ergänzung der zukünftigen Normengeneration dienen. Daher werden im Folgenden die wesentlichen Teile von [2] vorgestellt.

2 Aufbau der Technical Specification

Um eine einfachere Zugänglichkeit zu den Normen zu erzielen, ist es ein Merkmal der EN-Reihe, dass diese vergleichbar aufgebaut sind. Daher ist [2] in folgende Kapitel gegliedert:

- 0 Einleitung
- 1 Anwendungsbereich
- 2 Normative Verweise
- 3 Begriffe und Symbole
- 4 Bemessungsgrundlage
- 5 Baustoffe
- 6 Dauerhaftigkeit
- 7 Tragwerksberechnung
- 8 Grenzzustände der Tragfähigkeit
- 9 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Nach diesen „Standardkapiteln“ sind in [2] folgende weitere Kapitel vorhanden:

- 10 Verbindungen
- 11 Konstruktive Ausführung und Ausführung
- Anhang A (informativ): Jährliche Schwankungen der über den Querschnitt gemittelten Holzfeuchte bei Holz-Beton-Verbundbauteilen unter veränderlichen Umgebungsbedingungen
- Anhang B (informativ): Berechnung der Auswirkungen unelastischer Dehnungen
- Anhang C (informativ): Experimentelle Bestimmung der Tragfähigkeit und des Verschiebungsmoduls von Holz-Beton-Verbindungen

Im Gesamten besteht [2] aus 46 Seiten Normtext und 13 Seiten Anhänge. Um dieses Dokument baurechtlich einführen zu können, ist ein Nationaler Anhang zu erstellen. Wesentliche Aufgabe des Nationalen Anhangs sind dabei national festzulegende Parameter, wie z.B. Teilsicherheitsbeiwerte, zu bestimmen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, den Anwendungsbereich von [2] anzupassen. Zum Zeitpunkt der Manuskripterstellung wurde der erste Entwurf des Nationalen Anhangs [3] in der Arbeitsgruppe erstellt und zur Diskussion auf die nächste Ebene weitergeleitet. Der aktuelle Entwurf des Nationalen Anhangs [3] umfasst dabei 14 Seiten Normtext und 7 Seiten Anhänge. Sowohl für [2] als auch für den Nationalen Anhang [3] sind Hintergrundberichte vorhanden, bei denen jeder Paragraph begründet und erklärt wird.

3 Anwendungsbereich

Für die Ausführung von Holz-Beton-Verbunddecken stehen eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verfügung. Allerdings sind nicht alle Kombinationen ausreichend durch Versuche und/oder analytische Studien untersucht worden. Daher ist der Anwendungsbereich von [2] durch folgende Randbedingungen festgelegt:

- Holz: [2] baut auf [4] auf. Damit sind alle Materialien, die in diesem Teil geregelt sind, prinzipiell verwendbar. Lediglich bei der Verwendung der Kerne kommt es zu einer Einschränkung des Materials auf mindestens C24 bzw. mindestens GL24.
- Beton: Für den Beton dürfen folgende Betonfestigkeitsklassen verwendet werden:
 - Normalbeton: $\geq C12/15$; $\leq C60/80$
 - Leichtbeton: $\geq LC12/15$; $\leq LC60/80$

Lediglich bei der Verwendung der Kerne entsprechend den im Rahmen von [2] gegebenen Parametern ist eine Mindestbetongüte C20/25 vorgegeben.

- Bewehrung: Für die Bewehrung wird auf [5] verwiesen, so dass alle dort verwendbaren Bewehrungen auch bei Holz-Beton-Verbundbauteilen verwendet werden dürfen.
- Nutzungsklasse: Prinzipiell sollte Holz nur in Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden. Allerdings ist diese Definition von Land zu Land unterschiedlich. So ist z.B. in [6] der maximale Regeneinfallswinkel definiert, der die Grenze zwischen Nutzungsklasse 2 und Nutzungsklasse 3 definiert. Da es diese Regelung zum heutigen Stand nicht in allen europäischen Ländern gibt, ist die Einstufung von Bauteilen in Nutzungsklassen teilweise recht unterschiedlich. Daher wird in [2] keine generelle Einschränkung der Nutzungsklasse eingeführt. Lediglich die Nutzungsklasse der Fuge ist dahingehend vorgegeben, dass die Fuge so auszubilden ist, dass sie in Nutzungsklasse 1 oder 2 eingestuft werden kann.
- Im Hinblick auf die Abmessungen ist vorgegeben, dass die Betonplatte mindestens 50mm aber maximal 300mm Bauteildicke aufweist. Die Dicke von eventuell eingebauten Zwischenschichten darf nach aktuellem Stand maximal 50mm betragen.

4 Wesentliche Besonderheiten bei der Bemessung von Holz-Beton nach der Technical Specification im Hinblick auf das Kurzzeitverhalten

4.1 Belastung/Einwirkungen

4.1.1 Allgemeines

Ein wesentlicher Unterschied bei der Bemessung von Holz-Beton-Verbundbauteilen im Vergleich zu reinen Holz- oder Betonbauteilen sind die zu berücksichtigenden Einwirkungen. Ändert sich die Temperatur, der Feuchtegehalt des Holzes oder schwindet der Beton, wird diese Relativverschiebung des einen Verbundpartners durch den anderen behindert (vgl. Abb. 1).

Die dabei entstehenden Schnittgrößen und Verformungen lassen sich durch eine Superposition verschiedener Zustände abbilden. Im ersten Schritt werden dabei beide Querschnitte voneinander getrennt betrachtet, so dass sie sich unabhängig verformen können. Diese unabhängige Verformung wird allerdings durch die Verbindungsmittel verhindert, so dass der sich verkürzende Teilquerschnitt durch eine Kraft wieder so verlängert wird, dass die beiden Querschnitte gleich lang sind. Aus Gründen des Gleichgewichts wird diese Belastung auf den Verbundquerschnitt wieder aufgebracht. Daraus ergibt sich, dass nur die Relativverschiebung zwischen beiden Querschnitten von Bedeutung ist. Schwinden oder quellen beide Querschnitte in einem vergleichbaren Maß, entsteht keine Kraft, um beide Querschnitte auf die gleiche Länge zu bringen. Dies ist auch der Grund, warum das Quellen und Schwinden des Holzes bei den üblichen Holz-Holz-Verbundträgern nur von untergeordneter Bedeutung ist.

Verkürzt sich der oben liegende Beton relativ zum unten liegenden Holz, hat dies zur Folge:

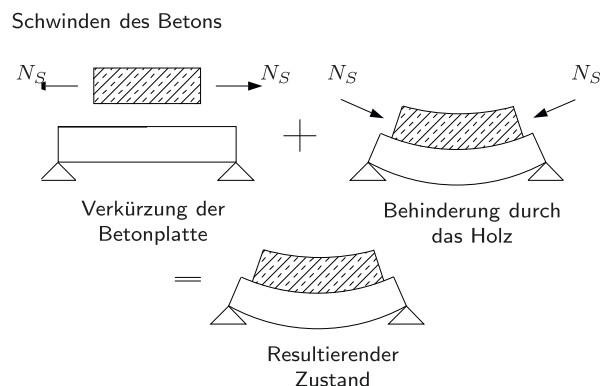


Abbildung 1: Auswirkungen der spannungslosen Dehnung z.B. infolge Temperaturabnahme oder Schwinden des Betons

- Abnahme der Normalkraft: Da sich der Beton verkürzt, entsteht daraus eine Druckkraft im Holz. Die resultierenden Belastungen aus äußerer Last und Schwinden des Betons führen dazu, dass die Normalkraft im Teilquerschnitt abnimmt.
- Abnahme der Belastung der Verbindungsmittelbelastung: Nimmt die Normalkraft im Teilquerschnitt ab, nimmt auch die Verbindungsmittelbelastung ab, da diese „nur“ dazu dient, die Druckkraft im Beton mit der Zugkraft im Holz kurzzuschließen.
Diese Abnahme hat auch zur Folge, dass Schwinden des Betons auch dann berücksichtigt werden muss, wenn das plastische Verhalten der Verbindungsmittel berücksichtigt wird. Während durch das Fließen des Stahls und des Betons und des Reißen des Betons erreicht wird, dass Schwinden bei Stahlbetonbauteilen in der Bemessung nicht berücksichtigt werden muss, entsteht bei Holz-Beton-Verbundbauteilen durch Schwinden des Betons eine Abnahme der Normalkraft und der Verbindungsmittelbelastung. Durch die Entlastung der Verbindungsmittel hat das plastische Vermögen der Verbindungsmittel keine Auswirkungen auf die Schnittgrößenaufteilung im Lastfall Schwinden.
- Zunahme des Moments im Holz: Da die Normalkraft abnimmt, die äußere Belastung aber konstant ist, steigt das Moment im Teilquerschnitt an.
- Zunahme der Verformung: Durch das Schwinden des Betons entzieht sich dieser seiner Druckbelastung, so dass der Verbundbauanteil am Lastabtrag abnimmt. Daher muss ein größerer Teil über Biegung abgetragen werden, so dass die Verformung des Gesamtbauteils zunimmt.

Verkürzt sich das unten liegende Holz relativ zum oben liegenden Beton treten die umgekehrten Effekte auf. Durch diese unterschiedlichen Dehnungen der beiden Teilquerschnitte entstehen Eigenspannungen, die sich in Verformungen bemerkbar machen. So zeigt sich in [1], dass die Verformungen der Decken erst dann realitätsnah abgebildet werden können, wenn Schwinden des Betons berücksichtigt wird. Darüber hinaus sind auch Eigenspannungen Spannungen, die die Tragfähigkeit des Bauteils beeinflussen. Im Vergleich zu anderen Materialien hat Holz unter einer Zugbeanspruchung eher ein sprödes Verhalten, so dass diese Eigenspannungen nicht durch eine plastische Verformung abgebaut werden können. Daher sind diese Einwirkungen im Nachweis zu berücksichtigen.

4.1.2 Anzusetzende Belastungen

Im Hinblick auf die Belastungen ergibt sich also, dass folgende Einwirkungen berücksichtigt werden müssen:

- „übliche“ äußere Belastungen infolge Eigengewicht, Verkehr, Schnee, Wind etc. nach [7] ff.
- Eigenspannungen hervorrufende Einwirkungen wie z.B. Temperatur, Schwinden und Quellen des Holzes und Schwinden des Betons

Entsprechend [2] wird – vereinfachend – zugelassen, dass Temperaturänderungen und Auswirkungen der Feuchteänderungen in quasi-konstanter Umgebung vernachlässigt werden dürfen. Diese quasi-konstante Umgebung ist durch folgende Größen definiert:

- Das Holzfeuchte entspricht – im ingenieurmäßigen Sinn – zum Zeitpunkt des Einbaus der Ausgleichsfeuchte.
- Die Differenz zwischen minimaler und maximaler Holzfeuchte innerhalb eines Jahres ist kleiner/gleich 6%.
- Die Änderung der Lufttemperatur überschreitet nicht 20°C

Dies bedeutet, dass bei typischen Situationen der Nutzungsklasse I die Temperaturänderungen und die Feuchteänderungen (und damit das Quellen & Schwinden des Holzes) vernachlässigt werden dürfen. Schwinden des Betons ist dagegen auch bei quasi-ständigen Umgebungsbedingungen sowohl im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit als auch im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigen.

Sollten die Umgebungsbedingungen nicht als quasi-konstante Umgebungsbedingungen eingestuft werden können, müssen zusätzlich zum Schwinden des Betons Temperaturänderungen und Quellen/Schwinden des Holzes in der Berechnung berücksichtigt werden.

Für die Ermittlung der inelastischen Dehnungen stehen verschiedene Quellen zur Verfügung:

- Temperatur nach [8], wobei prinzipiell zwei Einwirkungen zu unterscheiden sind
 - Temperaturdifferenz zwischen Temperatur beim Einbau und mittlere Temperatur im Betrieb
 - Jährliche Temperaturschwankungen
- Schwinden des Betons nach [5]
- Schwinden und Quellen des Holzes: Ähnlich wie bei der Temperatur sind beim Schwinden und Quellen des Holzes prinzipiell auch zwei verschiedene Einwirkungen infolge Feuchteänderung des Holzes zu beachten
 - Feuchteunterschied zwischen Einbau und Ausgleichsfeuchte
 - Jährliche Feuchteschwankungen: Für die Ermittlung des jährlichen Quellen bzw. Schwindens des Holzes werden im Anhang A von [2] Regelungen gegeben, anhand dieser die erwartete Feuchteänderung für ein überdachtes, nicht beheiztes Bauteil mit direktem Zugang der Außenluft ermittelt werden kann.

Die Ermittlung diese jahreszeitlichen Feuchteänderungen erfolgt – sofern keine genaueren Daten bekannt sind – in folgenden Schritten:

- Festlegung der Klimazone des Gebäudes anhand des Köppen-Geiger-Diagramms (vgl. Abb. 2)
- Ermittlung der Feuchte durch Interpolation der in [2] gegebenen Werte für Querschnitte mit verschiedenen Breiten (vgl. Tab. 1)

Tabelle 1: Rechnerische Feuchteschwankungen in % im Querschnitt $\Delta mc = \max mc - \min mc$ (Auszug aus [2])

Bez.	Breite in mm		
	38	125	>300
Gemäßigt ozeanisch Stuttgart, Paris, London CFB	15	9	3
Gemäßigt kontinental südliche Gebiete Warschau, Berlin, München, Prag DFB.2	15.5	9	3.5

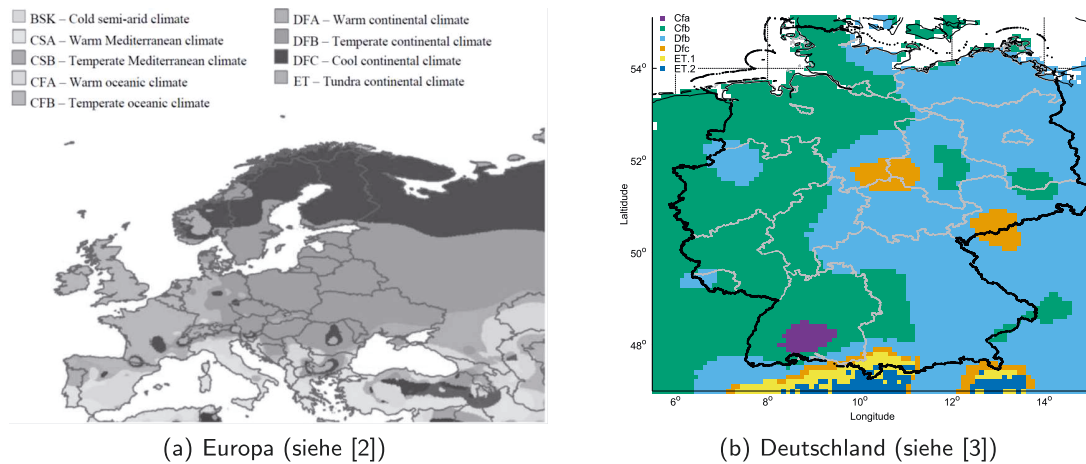


Abbildung 2: Köppen-Geiger-Diagramm

- Modifikation der Feuchte in Abhängigkeit der Nutzungsklasse
- Ermittlung der Dehnung durch

$$\varepsilon = \alpha_{||} \cdot \Delta u \quad (1)$$

- ε effektive Dehnung infolge Feuchteänderung
- Δu Feuchteänderung; ermittelt aus Tab. 1
- $\alpha_{||}$ Ausdehnungskoeffizient des Holzes parallel zur Faser
= 0,01%/‰ Δu entsprechend [9]

Werden die verschiedenen Zulassungen ausgewertet, ergibt sich, dass die Berücksichtigung der Dehnungen infolge Feuchteänderung des Holzes und Schwinden des Betons eigentlich bereits in den Zulassungen gefordert wird. Ein wesentlicher Unterschied zwischen [2] und den Zulassungen ist allerdings, dass bei [2] diese Einflussparameter explizit zu berücksichtigen sind, während in den Zulassungen diese Einflussparameter in einer globalen Abminderung der E-Moduli erfasst werden.

4.1.3 Teilsicherheitsbeiwerte

Für die Teilsicherheitsbeiwerte werden im Wesentlichen die Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend der Einteilung in [10] verwendet. So werden für ständig wirkende Lasten und eingeprägte Verformungen ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_F = 1,35$ vorgeschlagen, während für variable Lasten ein Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_F = 1,5$ zur Anwendung kommen soll. Die Belastungen infolge der Unterschiede zwischen Einbau- und Endzustand und infolge der jährlichen Schwankungen wie z.B. Temperatur, Schwinden des Betons und/oder Feuchte werden daher mit einem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma_F = 1.35$ versehen.

4.1.4 Klassen der Lasteinwirkungsdauern

Bezüglich der Klassen der Lasteinwirkungsdauern werden die Einteilungen nach [4] übernommen. Damit wird das Schwinden und die Änderungen vom Zeitpunkt des Einbaus bis zum Endzustand als ständige Belastung angesehen, während die jährlichen Schwankungen der Klasse der Lasteinwirkungsdauer „mittel“ zugeordnet werden.

4.2 Modifikationsbeiwerte

Um den Einfluss der Zeit und der Feuchte auf die Festigkeit zu erfassen, sind in [4] Modifikationsfaktoren der Festigkeit k_{mod} eingeführt. Für den Holzquerschnitt werden diese Werte direkt übernommen.

Im Hinblick auf die Verbindungsmittel wurde das Konzept für die Verbindung von Bauteilen aus Holz bzw. Holzwerkstoffplatten übernommen. Für den k_{mod} -Wert wird dabei der Festigkeitsbeiwert des Betons zur

Berücksichtigung von Langzeiteffekten α_{cc} angenommen, so dass sich für das Verbindungsmittel folgender Modifikationsbeiwert ergibt:

$$k'_{mod} = \sqrt{k_{mod} \cdot \alpha_{cc}} \quad (2)$$

- k'_{mod} Modifikationsbeiwert der Verbindung
- k_{mod} Modifikationsbeiwert des Holzes
- α_{cc} Festigkeitsbeiwert des Betons zur Berücksichtigung der Langzeitfestigkeit
i.d.R. =0.85

Anzumerken ist, dass der k'_{mod} -Beiwerte nur bei Verbindungsmittel zur Anwendung kommt, bei denen die Festigkeiten der einzelnen Querschnittspartner sich gegenseitig beeinflussen. Dies ist z.B. bei einer Bestimmung der Tragfähigkeit nach der Johansen-Theorie der Fall (siehe Abs. 5.2). Lassen sich die Tragfähigkeit in einzelne Traganteile aufteilen (wie z.B. bei der Kerne, siehe Abs. 5.3) ist der jeweilige k_{mod} -Wert der Festigkeit anzusetzen.

4.3 Ermittlung der Schnittgrößen

4.3.1 Verfahren

Wie bei Holz-Verbindungen üblich, beeinflusst die Nachgiebigkeit der Verbindung das Trag-und Verformungsverhalten des Verbundträgers maßgeblich. So sind alle Verbindungen mit Ausnahme der Klebung als nachgiebig einzustufen. Diese Nachgiebigkeit ist daher bei der Ermittlung der Schnittgrößen zu beachten. Dazu stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- Differentialgleichung (siehe z.B. [11] oder [12])
- γ -Verfahren nach [4], Anhang B
- Schubanalogie-Verfahren nach [13] (siehe auch [14] oder [15])
- Modellierung als Stabwerksystem (siehe u. a. [16])
- FE-Modellierung

Die Entscheidung, welches Verfahren verwendet werden soll, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab. So kommen im wissenschaftlichen Bereich eher FE-Modelle zum Einsatz, während bei der Bemessung der üblicherweise 2-schichtigen Holz-Beton-Verbundbauteile eher die γ -Methode oder das Modellierung als Stabwerk zum Einsatz kommen.

Die Anwendung des γ -Verfahrens ist allerdings eingeschränkt. So ist die Anwendung eigentlich nur dann möglich, wenn folgende Randbedingungen eingehalten sind:

- Einfeldträger
- *sin*-förmige Gleichstreckenlast
- gleichmäßig verteilte Verbindungsmittel
- maximal drei nachgiebig angeschlossene Schichten

Im Lauf der Zeit wurden einige Erweiterungen entwickelt, so dass nach [4] dieses Verfahren auch für Durchlaufträger und Kragarme bei konstanter Gleichstreckenlast angewandt werden kann. Sollten die Verbindungsmittel der Querkraft entsprechend abgestuft werden, darf dies durch die Modifikation des effektiven Abstands der Verbindungsmittel abgebildet werden.

$$s_{ef} = 0.75 \cdot s_{min} + 0.25 \cdot s_{max} \quad (3)$$

- s_{ef} effektiver Abstand
- s_{min} minimaler Abstand bei einer Abstufung entsprechend dem Querkraftverlauf
- s_{max} maximaler Abstand bei einer Abstufung entsprechend dem Querkraftverlauf

Abgeleitet von den Randbedingungen ist die Anwendung des γ -Verfahrens eigentlich nur für Verbindungsmittel mit einer gleichmäßigen Lasteinleitung möglich. Als Grenze wird bisher in [2] ein maximaler Abstand

der Verbindungsmittel von 5% der Spannweite angegeben, da ansonsten die Steifigkeit der Decke und damit die Schnittgrößen zu große Abweichungen aufweisen (siehe auch [17]).

Sollte diese Grenze nicht eingehalten werden, ist die Dehnsteifigkeit EA des angeschlossenen Querschnittsteils (i.d.R. = Betonquerschnitt) mit dem Faktor 0.7 zu modifizieren.

Bei der Verwendung von Brettspertholz als Holzquerschnitt der Holz-Beton-Vrebunddecke ist nach [3] das Brettspertholz als geschichtetes Element abzubilden, um die Schubbeanspruchung zwischen den Schichten erfassen zu können. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, indem die einzelnen Schichten im Fachwerkmodell abgebildet werden. Die Steifigkeit zwischen den einzelnen Schichten kann entsprechend der Schubanalogie bestimmt werden (siehe auch [9]).

4.3.2 Berücksichtigung der spannungslosen Dehnungen z.B. infolge Temperatur, Schwinden oder Quellen

Ein wesentlicher Unterschied bei Holz-Beton-Verbunddecken im Vergleich zu reinen Holz-Holz-Verbundträgern ist, dass die spannungslosen Dehnungen wie z.B. infolge Änderung der Temperatur, infolge Schwinden des Betons und/oder infolge Feuchteänderung im Holz bei der Berechnung berücksichtigt werden müssen.

Bei der Modellierung als Fachwerk kann diese Dehnung als effektive Temperaturdehnung dem jeweiligen Teilquerschnitt als Last aufgebracht werden. Beim γ -Verfahren nach [4], Anhang B ist die Berücksichtigung der spannungslosen Dehnung nicht ohne weiteres möglich. Um dennoch diese Methode anwenden zu können, wird in [2] Anhang B ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem die spannungslose Dehnung in eine Ersatzlast umgewandelt und eine wirksame Biegesteifigkeit ermittelt werden kann. An dieser Stelle wird auf [18–22] verwiesen.

4.3.3 Materialverhalten

Bei der Ermittlung der Schnittgrößen darf sowohl beim Holz als auch beim Beton unter Druck von einem elastischen Materialverhalten ausgegangen werden. Das Reißen des Betons unter Zug muss berücksichtigt werden. Um dies zu erreichen, wird die gerissene Zone iterativ bestimmt, indem eine nichttragende Zwischenschicht eingeführt wird, bis im verbleibenden Betonquerschnitt nur noch Druckspannungen vorhanden sind.

Das lineare Materialverhalten des Betons unter Druck wird auch beim Nachweis berücksichtigt, da bei diesem Nachweis auf das plastische Verhalten des Betons verzichtet werden darf. Damit ergibt sich für den Nachweis auf der Druckseite

$$\sigma_{c,d} \leq \alpha \cdot f_{cd} \quad (4)$$

- $\sigma_{c,d}$ Druckspannung des Betons unter der Annahme eines linear-elastischen Verhaltens unter Druck
- α Faktor zur Berücksichtigung von Langzeiteffekten
i.d.R. = 0.85
- f_{cd} Bemessungswert der Druckfestigkeit

Der Verzicht auf die Berücksichtigung des plastischen Verhaltens des Betons ist auch dadurch begründet, dass durch das plastische Verhalten des Betons die Steifigkeit des Betons abnimmt. Diese abnehmende Steifigkeit beeinflusst allerdings wiederum die Schnittgrößenaufteilung im Querschnitt, so dass bei einer Berücksichtigung des plastischen Verhaltens des Betons die Schnittgrößen im Holz ansteigen werden. Aufgrund des tendenziell spröden Versagens des Holzes unter Zug muss bei einer Berücksichtigung des plastischen Verhaltens diese Umlagerungen der Schnittgrößen erfasst werden.

Der Holzquerschnitt dagegen wird entsprechend [4] für die ermittelten Normalkraft und das ermittelte Moment nachgewiesen.

4.3.4 Kompatibilität

Der Bauteilnachweis wird mit Hilfe der Schnittgrößen der Teilquerschnitte geführt. [2] fordert allerdings beim Nachweis die Kontrolle der Kompatibilität. Bei der üblichen Bemessung von Stahlbetonbauteilen wird davon ausgegangen, dass die Bewehrung anfängt zu fließen und die maximale Druckdehnung erreicht wird. Damit wird an der Oberseite des Betonquerschnitts von einer Dehnung von etwa $\varepsilon_{\text{Beton}} = -3.5^\circ / \infty$ angenommen,

während auf der Höhe der Bewehrung von einer Dehnung im Stahl bzw. Beton von $\varepsilon_{Bew} \geq 2\text{‰}$ ausgegangen wird. Wird die maximale charakteristische Dehnung im Holz unter Biegung bestimmt, zeigt sich, dass diese maximale charakteristische Dehnung im Bereich der Fließdehnung des Stahls liegt.

Da das Holz i.d.R. aber unterhalb der Zugzone des Betons angebracht wird, ist die Dehnung im Holz – je nach Verbundfaktor γ – größer als die Dehnung in der Bewehrung (vgl. Abb. 3).

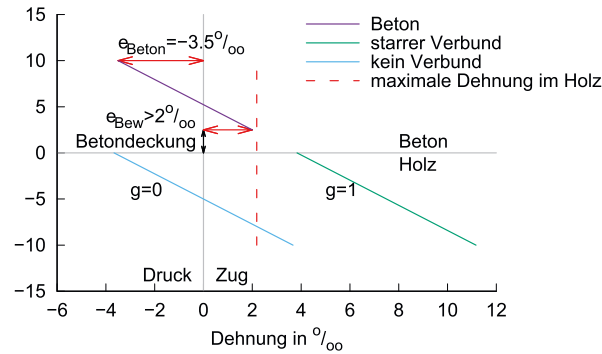


Abbildung 3: Verlauf der Dehnung im Verbundquerschnitt

Sollte also zusätzliche Bewehrung als tragendes Bauteil eingebaut werden, stellt sich die Frage, welche Dehnung in der Bewehrung entstehen kann. I.d.R. verbleibt die Bewehrung im elastischen Zustand, so dass die normale Stahlbetonbemessung z.B. mit Hilfe von Software nicht möglich ist.

4.3.5 Mittragende Breite

Auf die linienförmigen Holzbauteile werden Flächen aus Beton aufgebracht. Durch die damit einhergehende Schubverformung des Betons wirkt dieser nicht über die gesamte Breite mit. Daher wird üblicherweise immer eine mittragende Breite definiert, mit deren Hilfe eine äquivalente Spannung im Beton bei Vernachlässigung der Schubverformung erzielt wird.

Bei der Ermittlung dieser mittragenden Breite werden zwei Anteile berücksichtigt

- Scheibenanteil: Dieser Anteil entsteht, indem eine Normalkraft in die Scheibe eingeleitet wird.
- Plattenanteil: Dieser Anteil berücksichtigt die Ausbreitung eines Biegemoments in der Platte

Da – wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt – die Bewehrung nur eingeschränkt angesetzt werden kann, ist eigentlich der Scheibenanteil der wesentliche Anteil bei der Schnittgrößenermittlung von Holz-Beton-Verbunddecken. Werden die bisherigen Normen [23] und [5] miteinander verglichen, zeigt sich, dass [23] eher den Scheibenanteil abbildet als [5], so dass in [2] für die Ermittlung der mittragenden Breite auf [23] verwiesen wird.

5 Verbindungsmittel

5.1 Allgemeines

Die Verbindungsmittel stellen ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal bzw. wesentliche Besonderheiten zu anderen materialreinen Systemen dar. Diese Verbindungsmittel müssen einerseits die Lasten aus dem Holz ausleiten, andererseits muss eine ausreichende Verankerung im Beton vorhanden sein. Daher wurden eine Vielzahl an Verbindungsmittel entwickelt, die häufig über Zulassungen geregelt sind.

In [2] wird eine Schnittstelle geschaffen, mit dem Ziel, dass die zukünftige Bemessung der zugelassenen Verbindungsmittel mit Hilfe der Kennwerte aus den Zulassungen der einzelnen Verbindungsmittel und [2] erfolgen kann. Daher ist zu erwarten, dass es auch nach Einführung einer Bemessungsnorm für Holz-Beton-Verbundbauteilen weiterhin Zulassungen geben wird, zumal diese Bemessungsnorm nach aktuellem Stand „nur“ zwei Verbindungsmitteltypen regelt.

- stiftförmige Verbindungsmittel (inkl. eingeklebte Gewindestangen), die im 90°-Winkel zur Fuge eingebaut werden
- Kerven (= über die gesamte Breite des Holzes verlaufende ausbetonierte Vertiefung im Holz)

Geklebte Verbindungen oder Verbundbausystem, die im Wesentlichen die Belastungen durch Reibung übertragen, werden von dieser Norm nicht erfasst. Alle anderen Verbindungsmittel können prinzipiell verwendet werden, sofern die mechanischen Kenndaten wie Tragfähigkeit, Verschiebungsmodul im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Verschiebungsmodul im Grenzzustand der Tragfähigkeit z.B. durch Zulassungen bekannt sind.

Für alle Verbindungsmittel gilt, dass mindestens 10% der Abscherkraft rechtwinklig zur Fuge als öffnende Kraft aufgenommen werden können muss.

$$F_{\perp,d} = 0,1 \cdot F_{v,Ed} \quad (5)$$

F_{\perp} Beanspruchung rechtwinklig zur Fuge
 $F_{v,Ed}$ Bemessungswert der Abscherbeanspruchung in der Fuge

Hintergrund für diese Regelung ist, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass z.B. bei einem Einfeldträger eine unplanmäßige Einspannung durch die Wand entsteht. Damit besteht prinzipiell die Gefahr, dass sich das Holz vom Beton lösen kann. Hinzu kommt, dass Verkehrsbelastungen prinzipiell wiederkehrende Belastungen sind. Sollte diese Belastung häufiger auftreten, kann die Gefahr bestehen, dass sich z.B. die Kerne aus dem Holz „herausarbeitet“. In diesem Fall würde sich die Betonplatte ebenfalls vom Holz lösen. Um das Abheben in diesen Situationen zu verhindern, wird daher pauschal eine gewisse Beanspruchbarkeit \perp zur Fuge gefordert. Der Ursprung dieser Regelung ist allerdings bereits in [24] zu finden, so dass diese Regelung für [2] übernommen wurde.

5.2 Stiftförmige Verbindungsmittel

Tragfähigkeit Die Berechnung der stiftförmigen Verbindungsmittel in Holz-Holz-Verbindungen und Holz-Stahl-Verbindungen ist in [4] geregelt. Die Tragfähigkeit dieser Verbindungsmittel basiert auf der Theorie nach [25], in der für das lokale Versagen bei auf Abscheren beanspruchter, stiftförmige Verbindungsmittel sechs Versagensmodi identifiziert hat. Um die Tragfähigkeit dieser Versagensmodi zu bestimmen, wird das Gleichgewicht an der Scherfuge unter der Annahme eines (ideal)plastisches Verhaltens der verbundenen Bauteile und der Verbindungsmittel ermittelt.

Untersuchungen bei Holz-Beton-Verbundbauteilen zeigen, dass diese Anforderungen auch bei Holz-Beton-Verbundmittel und dem umgebenden Material infolge der lokalen Beanspruchung erfüllt ist.

Da diese Theorie nach [25] „nur“ auf der Lösung der Gleichgewichtsbedingungen an der Fuge basiert, kann diese Theorie auch bei Holz-Beton-Verbundbauteilen angewandt werden. Einzig die Lochleibungsfestigkeit des Betons ist bisher nicht eindeutig definiert. In [2] wird davon ausgegangen, dass die Teilflächenpressung des Betons angesetzt werden darf (siehe auch [5]), so dass die Lochleibungsfestigkeit dem 3-fachen der Druckfestigkeit entspricht.

Steifigkeit Für die Steifigkeit wird davon ausgegangen, dass die Verformungen im Beton im Vergleich zu denjenigen im Holz vernachlässigbar sind. Damit stellen sich die gleichen Verhältnisse wie bei Stahl-Holz-Verbindungen ein.

Da die Verschiebungsmoduln in [4] für Holz-Holz-Verbindungen gelten, wird davon ausgegangen, dass sich das stiftförmige Verbindungsmittel in beiden zu verbindende Bauteile eindrückt.

Bei einem stiftförmigen Holz-Beton-Verbindungsmittel ist allerdings davon auszugehen, dass dieses Eindrücken nur im Holz statt findet. Damit ist – in der Theorie – die Verschiebung nur halb so groß wie bei einer Holz-Holz-Verbindung, sofern die gleichen Lochleibungsspannungen herrschen. Ist die Verformung bei gleicher Kraft nur halb so groß, ist damit die Steifigkeit der Verbindung doppelt so groß.

- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit
 - Stabdübel, Bolzen mit oder ohne Lochspiel, Schrauben, Nägel (vorgebohrt)

$$K_{ser} = 2 \cdot \frac{\rho_m^{1,5} \cdot d}{23} \quad (6)$$

- Nägel (nicht vorgebohrt)

$$K_{ser} = 2 \cdot \frac{\rho_m^{1.5} \cdot d^{0.8}}{30} \quad (7)$$

- Nachweis der Tragfähigkeit: Die Steifigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird – wie im Holzbau üblich – durch folgende Beziehung bestimmt

$$K_u = \frac{2}{3} \cdot K_{ser} \quad (8)$$

Bei einer Zwischenschicht mit einer Dicke von $\leq 30\text{mm}$ und aus einer Material mit vergleichbarer Steifigkeit wie Vollholz, muss die Steifigkeit um 30% reduziert werden, sofern keine genaueren Angaben bekannt sind.

5.3 Kerven

Allgemeines Als Kerven werden über die gesamte Breite des Holzbauteils verlaufende Vertiefungen bezeichnet, die durch den Beton ausgegossen werden. Durch diesen Verguss ist eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt. Diese Verbindungen werden häufig bei flächigen Holzbauteilen angewandt, da sie relativ einfach und kostengünstig herstellbar sind.

Anwendungsbereich Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen, die nicht den gesamten möglichen Parameterbereich abdecken können, ist eine Begrenzung des Anwendungsbereichs notwendig. Für Kerven (vgl. Abb. 4) bedeutet dies, dass nach aktuellem Stand folgende Mindestanforderungen gestellt werden:

- Betongüte mindestens C20/25 mit maximalem Durchmesser des Zuschlagkorns von 16mm
- Brettschichtholz mind. der Festigkeitsklasse GL24, Vollholz mind. der Festigkeitsklasse C24 oder Furnierschichtholz; im Rahmen von [3] können Kerven auch bei Brettsperrholz verwendet werden
- Geometrie der Kerve
 - Tiefe $t \geq 20\text{mm}$ für übliche Belastungen (z.B. Hochbau) und $t \geq 30\text{mm}$ für hohe Belastungen (z.B. Brückenbau), wobei nach [3] eine maximale Tiefe von 50mm zulässig ist bei Brettsperrholzdecken darf nach [3] die Tiefe der Kerve maximal 50% der Decklamellendicke betragen
 - rechnerische Vorholzlänge $l_v \geq 8 \cdot t_v$, wobei aus Gründen der Duktilität und damit der Robustheit die tatsächliche Vorholzlänge der Kerve $l_v \geq 12.5 \cdot t_v$ betragen muss.
 - Länge der Kerve im Holz $l_N \geq 150\text{mm}$
 - Abhebesicherung durch Schrauben mit $\varnothing \geq 6\text{mm}$ (nach [3] nur Tellerkopfschrauben)
 - Neigungswinkel der Flanken

$$80^\circ \leq \alpha \leq \min \begin{cases} 115^\circ \\ 90^\circ + \Theta \end{cases} \quad (9)$$

Steifigkeit Die Steifigkeit wurde im Wesentlichen aus numerischen und experimentellen Untersuchungen ermittelt (siehe [17] und [26]).

$$K_{ser} = \begin{cases} 1000\text{kN/mm/mBreite} & \text{für } t = 20\text{mm} \\ 1500\text{kN/mm/mBreite} & \text{für } t \geq 30\text{mm} \end{cases} \quad (10)$$

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit muss die Steifigkeit der Kerve – im Gegensatz zu anderen Verbindungsmitteln - nicht auf 2/3 der Steifigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit reduziert werden. Daher darf im Grenzzustand der Tragfähigkeit die gleiche Steifigkeit angesetzt werden wie im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Bei der Verwendung von Kerven in Brettsperrholz ist die Steifigkeit der Kerve durch eine Grenzwertbetrachtung abzubilden. So sind nach [3] als untere Grenze 80% der Kervensteifigkeit nach [2] und als obere Grenze 100% der Kervensteifigkeit nach [2] anzuwenden.

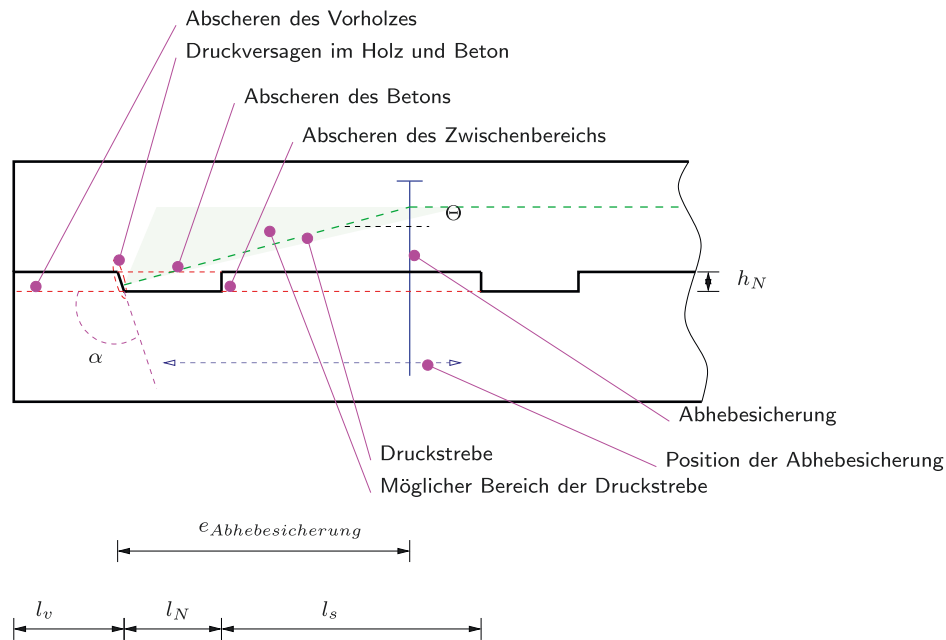


Abbildung 4: Kerbe als Verbindungsmittel

Tragfähigkeit Für die Tragfähigkeit der Kerbe werden die möglichen Versagensmodi in den Bemessungsgleichungen abgebildet (siehe [17], [26] und Abb. 4)

- Abscheren der Betonnocke
- Druckversagen der Kerwenflanke im Beton
- Schubversagen des Vorholzes,
- Druckversagen der Kerwenflanke im Holz, wobei maximal das 8-fache der Kervertiefe als Vorholz angesetzt werden darf

Diese Versagensmodi lassen sich durch folgende Beziehungen bestimmen

$$F_{R,k} = \begin{cases} f_{v,c,d} \cdot b_N \cdot l_N & \text{Abscheren der Betonnocke} \\ f_{c,d} \cdot b_N \cdot h_N & \text{Druckversagen Beton} \\ k_{cr} \cdot f_{v,h,d} \cdot b_N \cdot \min(l_v, l_s) & \text{Abscheren des Holzes} \\ f_{h,0,d} \cdot b_N \cdot h_N & \text{Druckversagen Holz} \end{cases} \quad (11)$$

$F_{R,d}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit der Kerbe

$f_{v,c,d}$ „Schubfestigkeit“ des Betons

$$= \frac{\nu \cdot f_{c,d}}{\cot\Theta + \tan\Theta}$$

ν Reduktionsfaktor der Tragfähigkeit zur Berücksichtigung der Risse im Beton bei einer Schubbeanspruchung

$$= 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

b_N Breite der Kerbe, i.d.R 1m

l_N Länge der Betonnocke

$f_{c,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit des Betons

$f_{h,0,d}$ Bemessungswert der Druckfestigkeit des Holzes parallel zur Faser an der Kerwenflanke unabhängig vom Winkel α (vgl. Abb. 4)

h_N Kervertiefe

$f_{v,d}$ Bemessungswert der Schubfestigkeit der Kerbe

l_v Vorholzlänge

l_s Länge des Holzes zwischen den Kerven

Θ Druckstrebenwinkel

Für die Bestimmung der Bemessungswerte der Festigkeit sind die Modifikationsbeiwerte der einzelnen Materialien (also z.B. k_{mod} bzw. α_{cc} und nicht die kombinierten Modifikationsbeiwerte nach Gl. (2)) zu verwenden. Zusätzlich zu diesen Versagensmodi soll eine abhebende Belastung angesetzt werden, die sich aus der Druckstrebenneigung ergibt.

$$F_{\perp,d} = \max \begin{cases} F_{\perp,d} & \text{nach Gl. (5)} \\ F_{R,d} \cdot \tan\Theta \end{cases} \quad (12)$$

Die Lage der Abhebesicherung darf in gewissen Grenzen frei gewählt werden. Die Lage der Abhebesicherung ist dabei so abzustimmen, dass der Schnittpunkt der Druckstrebe mit dem Winkel Θ und der Schwerachse des Betonquerschnitts sich an der Abhebesicherung schneiden. Damit hängen der gewählte Druckstrebenneigungswinkel Θ und die Lage der Schraube unmittelbar voneinander ab (vgl. Abb. 4).

$$e_{\text{Abhebesicherung}} = \frac{h_{\text{Beton}} + h_N}{2 \cdot \tan\Theta} \quad (13)$$

$e_{\text{Abhebesicherung}}$	Abstand der Abhebesicherung von der belasteten Kervenflanke
h_{Beton}	Dicke der Betonplatte
h_N	Kerventiefe
Θ	Druckstrebenwinkel

Der Druckstrebenwinkel darf in gewissen Grenzen frei gewählt werden, wobei sich der untere Grenzwert des Druckstrebenwinkels als Maximalwert der beiden folgenden Grenzen ergibt

- Verhinderung des Einschneidens der unbelasteten Kervenflanke in die Druckstrebe

$$\Theta_{\min,1} = \arctan\left(\frac{h_N}{l_N}\right) \quad (14)$$

- Sicherstellung der Beanspruchung der Abhebesicherung „nur“ durch eine Kerve

$$\Theta_{\min,2} = \arctan\left(\frac{h_N + h_{\text{Beton}}}{2 \cdot (l_N + l_v)}\right) \quad (15)$$

- untere Grenze des Druckstrebenwinkels

$$\Theta_{\min} = \max(\Theta_{\min,1}; \Theta_{\min,2}) \quad (16)$$

Die untere Grenze des Druckstrebenwinkels Θ für den Nachweis der Querkraftabtragung nach [5] muss nicht eingehalten werden, da dieser Druckstrebenwinkel auf die Unterkante des Bauteils bezogen wird. Die Querkraft wirkt aber rechtwinklig zu dieser Unterkante, so dass der Druckstrebenwinkel für den Querkraftabtrag nach [5] nicht dem Druckstrebenwinkel nach [2] entspricht, da beim Druckstrebenwinkel nach [2] die Kraft parallel zur Bauteilkante verläuft.

Wie aus Gl. (11) ersichtlich wird, beeinflusst der gewählte Druckstrebenwinkel die Tragfähigkeit der Kerve, wobei dieser Druckstrebenwinkel in gewissen Grenzen frei gewählt werden kann. Je geringer der Druckstrebenwinkel ist, desto kleiner ist die abhebende Komponente und desto weniger Schrauben werden notwendig. Parallel dazu sinkt allerdings auch die Tragfähigkeit der Verbindung. Wird als optimaler Druckstrebenwinkel Θ_{opt} derjenige Winkel bestimmt, bei dem die Tragfähigkeit der Kerve infolge Abscheren des Betons gleich der kleinsten Tragfähigkeit aus Abscheren des Vorholzes und Druckversagen des Betons bzw. des Holzes in der Kervenflanke ist.

$$\begin{aligned} F_{Rd, \text{Abscheren Beton}} &= f_{v,c,d} \cdot b \cdot l_N \\ &= F_{Rd, \text{min, Ohne Abscheren Beton}} \\ &= \min \begin{cases} F_{Rd, \text{Betondruck}} &= f_{c,d} \cdot b \cdot h_N \\ F_{Rd, \text{Abscheren Holz}} &= k_{cr} \cdot f_{v,d} \cdot b \cdot \underbrace{\min(l_v, l_s, 8 \cdot h_N)}_{\text{de facto } 8 \cdot h_N} \\ F_{Rd, \text{Druckversagen Holz}} &= f_{c,0,d} \cdot b \cdot h_N \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

Wird in diese Gleichung die „Schubfestigkeit“ des Betons eingesetzt, kann der Druckstrebenwinkel bestimmt werden, bei dem nicht das Abscheren des Betons maßgebend wird.

$$\tan\Theta_{opt} = \frac{\nu \cdot f_{cd} \cdot b_N \cdot l_N - \sqrt{(\nu \cdot f_{cd} \cdot b_N \cdot l_N)^2 - 4 \cdot F_{Rd,min,Ohne\ Abscheren\ Beton}^2}}{2 \cdot F_{Rd,min,Ohne\ Abscheren\ Beton}} \geq 0.1 \quad (18)$$

Der Mindestwert von 0.1 ist aus Gl. (5) abgeleitet.

Anzumerken ist, dass aus der Auswertung von Versuchen teilweise die Rückschlüsse gezogen werden, dass Abhebesicherungen nicht notwendig wären. Dabei ist allerdings zu beachten, dass Versuche nur einen Ausschnitt der Realität darstellen und nicht zwingend alle Einflüsse berücksichtigt werden können. So werden im Versuch i.d.R. unplanmäßige Einspannungen durch aufsteigende Wände vernachlässigt und nur statische Belastungen aufgebracht. Ein „Herausarbeiten“ der Kerne durch wiederholende Belastungen wird i.d.R. nicht erfasst. Weiterhin ist es im Versuch kaum möglich, die Zugfestigkeit des Betons komplett auszuschalten, obwohl für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen nach [5] Abs. 6.1.(2) keine Betonzugfestigkeit berücksichtigt wird. Auch werden die Versuche i.d.R. nach 28 Tagen durchgeführt, um das Verhalten bei der nominellen Festigkeit bestimmen zu können. Zu diesem Zeitpunkt ist z.B. bei einer 80mm dicken Betonplatte nur 20% der Schwinddehnung entstanden. Aus diesen Gründen wurden die experimentellen Untersuchungen mit analytischen Untersuchungen abgeglichen. Da allerdings die Kerkraft außerhalb der Kernweite angreift, sind immer Zugspannungen im Beton vorhanden. Sollte [5] Abs. 6.1.(2) eingehalten werden und damit keine Zugspannungen im Beton angesetzt werden, ist daher die Abhebesicherung einzubauen. Sollten allerdings genauere Bemessungsmodelle vorliegen, dürfen diese prinzipiell nach [2] Abs. 10.3.4.3(3) angewandt werden.

Für die Abhebesicherung sieht [3] die Verwendung von Tellerkopfschrauben vor, da bei diesem Schraubentyp die Nachweise gegeben sind. Die Verankerung und die Lastweiterleitung über die Fuge erfolgt über die Zulassung. Die Verankerung im Beton erfolgt über die Teilflächenpressung unter dem Tellerkopf. [3] weiterhin fordert den Nachweis des Betonausbruchs der Schraube nach [27], um sicherzustellen, dass der Tellerkopf nicht zu nahe am Rand des Betonbauteils eingebaut wird.

6 Wesentliche Besonderheiten bei der Bemessung von Holz-Beton nach der Technical Specification im Hinblick auf das Langzeitverhalten

6.1 Allgemeines

Bei Holz-Beton-Verbunddecken sind alle beteiligten Werkstoffe einem Kriechverhalten unterworfen. Durch dieses zeitabhängige Verhalten nimmt die Verformung der Decke im Lauf der Zeit zu. Darüber hinaus werden Spannungen umgelagert, so dass das Kriechen nicht nur aus Sicht der Gebrauchstauglichkeit, sondern auch im Nachweis der Tragfähigkeit berücksichtigt werden muss.

Die wesentlichen Unterschiede in [2] im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten Zulassungen der Verbindungsmittel als Berechnungsrichtlinie sind

- Berücksichtigung eines zusätzlichen Zeitraums
- Berücksichtigung der Auswirkungen der Lastumlagerungen infolge Kriechen

Im Folgenden soll auf diese beiden Punkte näher eingegangen werden.

6.2 Maßgebende Zeitpunkte (oder „Steifigkeit zieht Kräfte an“)

Bei der Bemessung von Bauteilen, die ein ausgeprägtes Kriechverhalten aufweisen, werden i.d.R. die Zeitpunkte $t = 0$ und $t = \infty$ nachgewiesen, wobei der Zeitpunkt $t = 0$ derjenige Zeitpunkt ist, bei dem das Tragwerk erstmals mit der Bemessungslast belastet ist, und der Zeitpunkt $t = \infty$ im Hochbau der Zeitdauer nach 50 Jahren entspricht. Um das Kriechen in der Berechnung abzubilden, wird der E-Modul modifiziert

$$E_{kriechen} = \frac{E_0}{1 + k_{def}} \quad (19)$$

- $E_{kriechen}$ effektiver E-Modul zur Berücksichtigung der Kriechverformung
- E_0 E-Modul ohne Kriechen, also zum Zeitpunkt $t = 0$
- k_{def} Deformationsfaktor bzw. Kriechzahl des Materials

Da Verbundkonstruktionen statisch unbestimmte Bauteile sind, wird die Belastung entsprechend dem Steifigkeitsverhältnis der Komponenten aufgeteilt. So bestimmt sich z.B. das Biegemoment beim γ -Verfahren durch

$$M_{Holz} = \frac{E_H \cdot J_H}{E_v \cdot J_{eff}} \cdot M_{ges} = n_{Holz} \cdot \frac{J_H}{J_{eff}} \cdot M_{ges} \tag{20}$$

Wird dieses Steifigkeitsverhältnis für das Langzeitverhalten ausgewertet, ergibt sich folgende Beziehung

$$\begin{aligned} n_{Holz} &= \frac{E_{Holz}}{E_{Beton}} \cdot \frac{1 + \varphi_{Beton}(t, t_0)}{1 + k_{def, Holz}(t)} \\ &= \frac{E_{Holz}}{E_{Beton}} \cdot \frac{1 + \varphi_{Beton}(t = \infty, t_0) \cdot f_{Beton}(t)}{1 + k_{def, Holz}(t = \infty) \cdot g_{Holz}(t)} \end{aligned} \tag{21}$$

- n_{Holz} Steifigkeitsverhältnis
- $\varphi_{Beton}(t = \infty, t_0)$ Endkriechzahl des Betons
- $k_{def, Holz}(t = \infty)$ Endkriechzahl des Holzes
- $f_{Beton}(t)$ Zeitfunktion der Kriechzahl des Betons
- $g_{Holz}(t)$ Zeitfunktion der Kriechzahl des Holzes

Damit hängt das Steifigkeitsverhältnis nicht nur vom jeweiligen E-Modul, sondern auch vom Verhältnis der jeweiligen Kriechzahl des Teilquerschnitts zum Zeitpunkt t ab. Weisen die beiden Querschnitte eine unterschiedliche Endkriechzahl, aber eine zeitlich affine Entwicklung wie z.B. beim Verbund zweier Betonbauteile auf ($g_{Holz}(t =) f_{Beton}(t)$) kann gezeigt werden, dass der Extremwert des Steifigkeitsverhältnisses und damit der Extremwert der Schnittgrößen bzw. Spannungen immer zu den Zeitpunkten $t = 0$ oder $t = \infty$ auftritt, sofern die Kriechzahl stetig ansteigt, indem sie z.B. asymptotisch gegen einen Grenzwert konvergiert.

Bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen haben beide Materialien sowohl unterschiedliche Endkriechzahlen als auch eine unterschiedliche zeitliche Entwicklung (vgl. Abb. 5).

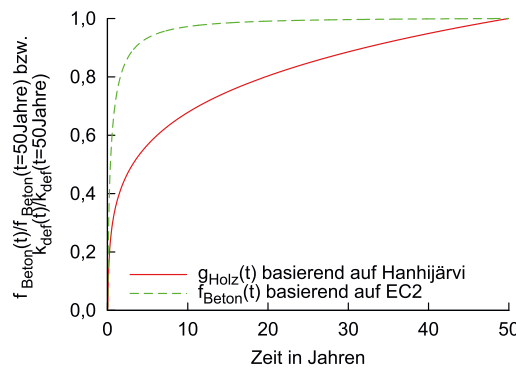


Abbildung 5: Zeitfunktionen der Kriechzahlen des Betons $f_{Beton}(t)$ und des Holzes $g_{Holz}(t)$

Werden die Verläufe der Kriechzahlen auf den Endwert normiert und gegenüber gestellt, zeigt sich, dass innerhalb der ersten 3 bis 7 Jahre der Beton stärker kriecht als das Holz. Damit nimmt das Steifigkeitsverhältnis n_{Holz} in diesem Zeitraum zu (vgl. Abb. 6), so dass in dessen Folge insbesondere das Moment im Holzquerschnitt ebenfalls zunimmt.

Im Zeitraum von 3 bis 7 Jahren ist die Kriechzahlentwicklung beider Querschnitte annähernd konstant. Damit werden in diesem Zeitraum keine wesentlichen Schnittgrößen umgelagert. Nach diesem Zeitraum ist ein Großteil des Kriechens des Betons abgeschlossen, so dass das Holz wiederum stärker als der Beton kriecht und damit seine Belastungen auf den Beton umlagern kann.

Zusammenfassend ist es bei Holz-Beton-Verbundkonstruktionen also nicht immer ausreichend, den Spannungsnachweis „nur“ zum Zeitpunkt $t = 0$ und $t = \infty$ durchzuführen, da sich auch Zwischenzustände infolge der unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung als kritisch erweisen können.

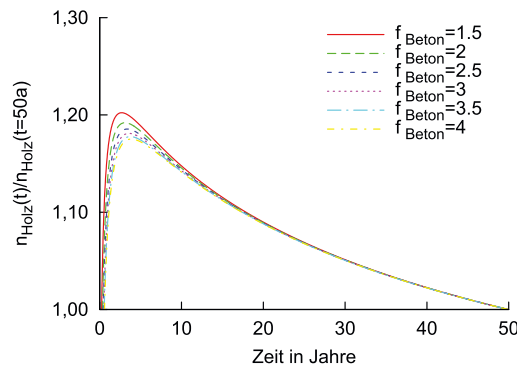


Abbildung 6: Verlauf des Verhältnisses der effektiven E-Moduli über die Zeit bezogen auf das Verhältnis nach 50 Jahren für eine Holz-Beton-Verbunddecke im Innern

Dieser zusätzliche Zeitpunkt stellt einen zusätzlich zu führenden statischen Nachweis dar. Wird die Holz-Beton-Verbunddecke allerdings im Gesamten betrachtet, zeigt sich, dass im eigentlichen Anwendungsbereich von Holz-Beton-Verbunddecken häufig der Verformungsnachweis maßgebend wird. Damit wird einerseits den Planenden ein weiterer Zeitpunkt „aufgebürdet“, der aber andererseits häufig nur eine geringe Auswirkung auf die Abmessungen haben wird, da die Verformung die Querschnittshöhen bestimmt.

Im Rahmen der Entwicklung von [2] wurde der Einfluss dieses zusätzlichen Zeitpunkts untersucht. Das wesentliche Ergebnis ist, dass dieser kritischen Zwischenzustand im Intervall zwischen 3 und 7 Jahren nicht nachgewiesen werden muss, sofern der Nachweis zu den Zeitpunkten $t = 0$ und $t = 50$ Jahre mit einer um 25% erhöhten Spannung der ständig wirkenden Belastung eingehalten ist.

6.3 Kriechen

Um das zeitabhängige Verhalten der Verbunddecke zu beschreiben, werden die Kriechzahlen der jeweiligen Materialnorm verwendet. Diese Kriechzahlen sind dabei als das Verhältnis der Kriechverformung zur elastischen Verformung definiert.

$$k_{def} = \frac{w_{kriechen}}{w_{elastisch}} \quad (22)$$

k_{def}	Materialkriechzahl
$w_{kriechen}$	Kriechverformung
$w_{elastisch}$	elastische (Ausgangs-) Verformung

Die Auswirkungen des Kriechens lässt sich durch eine Modifikation des E-Moduls erfassen:

$$E^* = \frac{E}{1 + k_{def}} \quad (23)$$

Durch die Verwendung des mit der Kriechzahl modifizierten E-Moduls kann also der Endzustand direkt bestimmt werden, so dass die Schnittgrößen im Endzustand bestimmt werden können. Strenggenommen ist allerdings diese Berücksichtigung des Kriechens nur dann zulässig, wenn keine z.B. durch angrenzenden Bauteile behinderte Dehnung vorhanden ist.

Wird das Bauteil in seiner Kriechverformung komplett behindert, wird dies als Relaxation bezeichnet. In diesem Fall ist die gesamte Verformung konstant über die Zeit. Wird für diesen Fall der effektive E-Modul bestimmt, ergibt sich für die Relaxation ein effektiver E-Modul von

$$E^* = \frac{E}{e^{k_{def}}} = \frac{E}{1 + \underbrace{\varphi_{Verbund}}_{e^{k_{def}} - 1}} \quad (24)$$

Dieser weicht deutlich vom reinen Kriechfall ab (vgl. Abb. 7).

In einem Holz-Beton-Verbundsystem werden allerdings die beiden Fälle „Kriechen“ und „Relaxation“ nicht erreicht. Weder handelt es sich um eine reine Kriechverformung, da die beiden Querschnittsteile Holz und

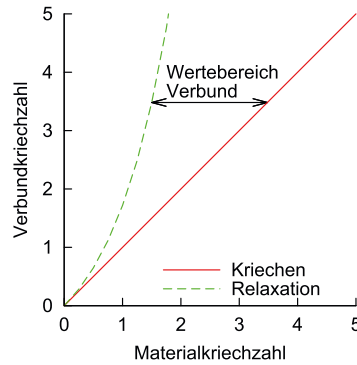


Abbildung 7: Wertebereich der effektiven Kriechzahl bei reinem Kriechen und Relaxation

Beton sich gegenseitig beeinflussen; noch handelt es sich um eine Relaxation, da die Steifigkeiten des Holz- bzw. Betonquerschnitts endliche Werte aufweisen und damit immer eine Verformung einhergehen wird. Dies hat zur Folge, dass sich die effektive Verbundkriechzahl zwischen der Kriechzahl des reinen Kriechens und der effektiven Kriechzahl bei Relaxation einstellt.

Dieses Phänomen tritt nicht nur im Holz-Beton-Verbundbau auf. [28] entwickelte eine Lösung für die Lastumlagerungen bei Betonbauteilen mit nachträglich aufgetragenen Betonen. [29] (siehe [30]) erweitert dieses Verfahren für den Holz-Beton-Verbund insbesondere hinsichtlich der Nachgiebigkeit in der Verbundfuge unter der Annahme einer verschmierten Verbindungsmittelsteifigkeit. In [19] wurde die unterschiedliche zeitliche Entwicklung berücksichtigt.

Damit erhält man Bestimmungsgleichungen für die effektive Kriechzahl φ_V beider Komponenten unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Verbundtragwirkung, des Einflusses der unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung und des Einflusses der Nachgiebigkeit in der Verbundfuge (vgl. [19] und Gl. (25)).

$$\Delta\varphi_{u,v,i} = \Delta\varphi_{u,M,i} \cdot \left(\frac{1 + \Delta\varphi_{w,M,i}}{\Delta\varphi_{w,M,i} - e^{-\Delta\psi_i} \cdot (\Delta\varphi_{w,M,i} - \Delta\psi_i)} - \frac{1}{\Delta\psi_i} \right) \quad (25)$$

- $\delta_{1,i}$ Flexibilität der Komponente i
- φ_i Materialkriechzahl der Komponente i
- ψ Systemkriechzahl

Allerdings sind diese Bestimmungsgleichungen für die Bemessung z.T. aufwendig, so dass Vereinfachungen angestrebt werden. Dazu wird in Anlehnung an [23] die Kriechzahl mit einem Beiwert ψ multipliziert (vgl. Tab. 2).

Um das Kriechen nun in der Schnittgrößenermittlung berücksichtigen zu können, wird also der E-Modul in der Berechnung durch folgende Beziehung ermittelt

$$E_H(t=) = \frac{E_0}{1 + \psi_H \cdot k_{def}} \quad \text{Holz} \quad (26)$$

$$E_B(t=) = \frac{E_0(t_{Belastung})}{1 + \psi_B \cdot \varphi} \quad \text{Beton} \quad (27)$$

$$K = \frac{K_0}{1 + \psi_{VBM} \cdot k'_{def}} \quad \text{Verbindung} \quad (28)$$

Die effektive Kriechzahl des Verbindungsmittels bestimmt sich zu

$$k'_{def} = 2 \cdot k_{def} \quad (29)$$

- k'_{def} effektive Kriechzahl des Verbindungsmittels
- k_{def} Endkriechzahl des Holzes

Die Vergrößerung der Kriechzahl bei den Verbindungsmittel um den Faktor 2 beruht auf der Tatsache, dass

Tabelle 2: Verbundfaktoren zur Ermittlung der Verbundkriechzahl für Deckensysteme ($b_H = b_B$, $1/5 < A_{B,eff}/A_H < 1$) und für Balken ($b_H \ll b_B$; $1 < A_{B,eff}/A_H < 5$)

Beton $\varphi = 3,5$; $k_{def} = 0,6$	
$\psi_B(t = 3 - 7a)$	$= 2,5 - \gamma_1^{1,1}$
$\psi_B(t = \infty)$	$= 2,6 - 0,8\gamma_1^2$
Beton $\varphi = 3,5$; $k_{def} = 0,8$	
$\psi_B(t = 3 - 7a)$	$= 2,2 - 0,8 \cdot \gamma_1^{1,2}$
$\psi_B(t = \infty)$	$= 2,3 - 0,5\gamma_1^{2,6}$
Beton $\varphi = 2,5$; $k_{def} = 0,6$	
$\psi_B(t = 3 - 7a)$	$= 1,9 - 0,6 \cdot \gamma_1^{1,1}$
$\psi_B(t = \infty)$	$= 2,0 - 0,5\gamma_1^{1,9}$
Beton $\varphi = 2,5$; $k_{def} = 0,8$	
$\psi_B(t = 3 - 7a)$	$= 1,7 - 0,5 \cdot \gamma_1^{1,1}$
$\psi_B(t = \infty)$	$= 1,8 - 0,3\gamma_1^{2,5}$
Holz in allen Fällen	
$\psi_H(t = 3 - 7a)$	$= 0,5$
$\psi_H(t = \infty)$	$= 1,0$
Verbindung in allen Fällen	
$\psi_{VBM}(t = 3 - 7a)$	$= 0,65$
$\psi_{VBN}(t = \infty)$	$= 1,0$

Für den Zeitpunkt $t = 0$ sind alle ψ -Werte zu 0 zu setzen.

lokal eine höhere Beanspruchung im Bereich der Verbindungsmittel auftreten kann, so dass hier größere Verformungen auftreten.

Da Kriechen und Schwinden sich gegenseitig beeinflussen können, bzw. die Auswirkungen des Schwindens durch das Kriechen teilweise reduziert werden, darf entsprechend [2] das Schwinden des Betons für den Zeitpunkt 3 bis 7 Jahre auf 60% und für den Endzeitpunkt auf 90% reduziert werden. Als Schwindbeginn ist auch im Fall der Herstellung der Decke auf einer Schalung bzw. Rüstung immer der Zeitpunkt des Endes der Nachbehandlung. Hintergrund dafür ist, dass die Schwinddehnung Eigenspannungen erzeugt, die nicht durch Kriechen innerhalb des Zeitraums der Lagerung nennenswert abgebaut werden können. Damit hat der Herstellungsablauf für die Schwinddehnung keine größeren Auswirkungen.

7 Bemessungsablauf

In Abb. 8 und Abb. 9 ist der Bemessungsablauf im Grenzzustand der Tragfähigkeit bzw. im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit dargestellt, wobei die wesentlichen Neuerungen von [2] im Vergleich zu einer Bemessung nach Zulassung in rot markiert sind.

Im Vergleich zu einer Bemessung von reinen Holzbauteilen ist ein wesentlicher Unterschied, dass Belastungen in kriecherzeugende Belastungen und kurzzeitig wirkende Belastungen aufgeteilt werden. Für diese beiden Gruppen werden die Spannungen und Verformungen getrennt berechnet. Lediglich die Schnittgrößen der kriecherzeugenden Belastungen sind mit den Steifigkeiten zum Zeitpunkt $t = 3$ bis 7 Jahre bzw. $t = 50$ Jahre zu berechnen.

Nach der Schnittgrößenermittlung mit den u.U. unterschiedlichen Steifigkeiten werden die Schnittgrößen der beiden Gruppen überlagert und der Nachweis geführt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Holz-Beton-Verbundbauweise wurde bereits vielfach untersucht und auch angewendet. So sind einige Verbindungsmittel mittlerweile zugelassen, so dass einer Anwendung von Holz-Beton-Verbund auf Basis dieser Zulassungen nichts im Wege steht. Um allerdings eine von den Zulassungen losgelöste Anwendung zu ermöglichen, ist mit der nächsten Generation der Eurocodes daran gedacht, den Holz-Beton-Verbundbau

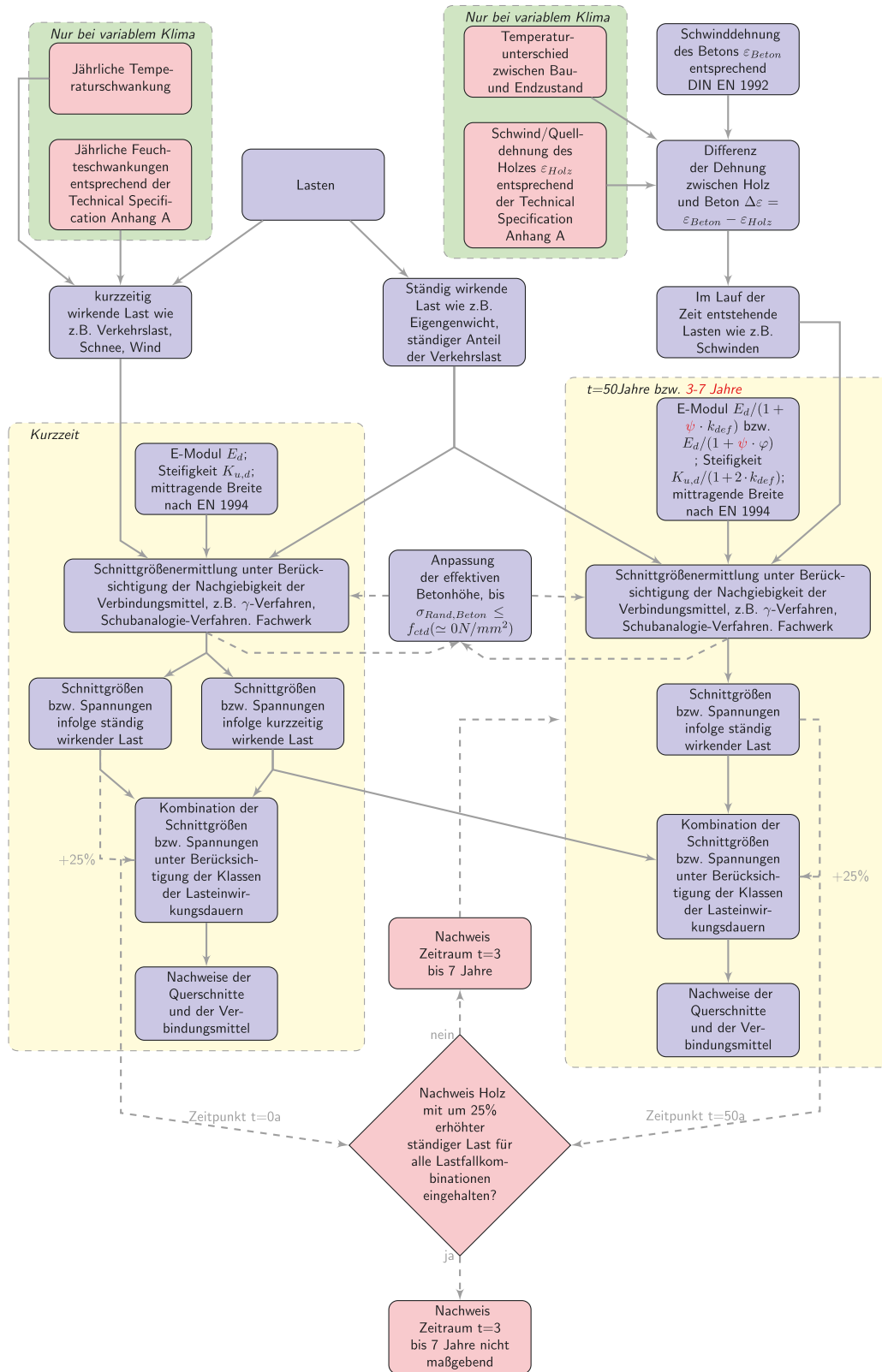


Abbildung 8: Bemessungsablauf für den Grenzzustand der Tragfähigkeit

normativ zu erfassen. Dazu wurde [2] als Technical Specification erstellt. Diese Technical Specification kann als Basis für einen zukünftigen Normenteil dienen. [2] unterscheidet sich im Vergleich zu den üblicherweise vorhandenen Regelungen der Zulassungen im wesentlichen in folgenden Punkten

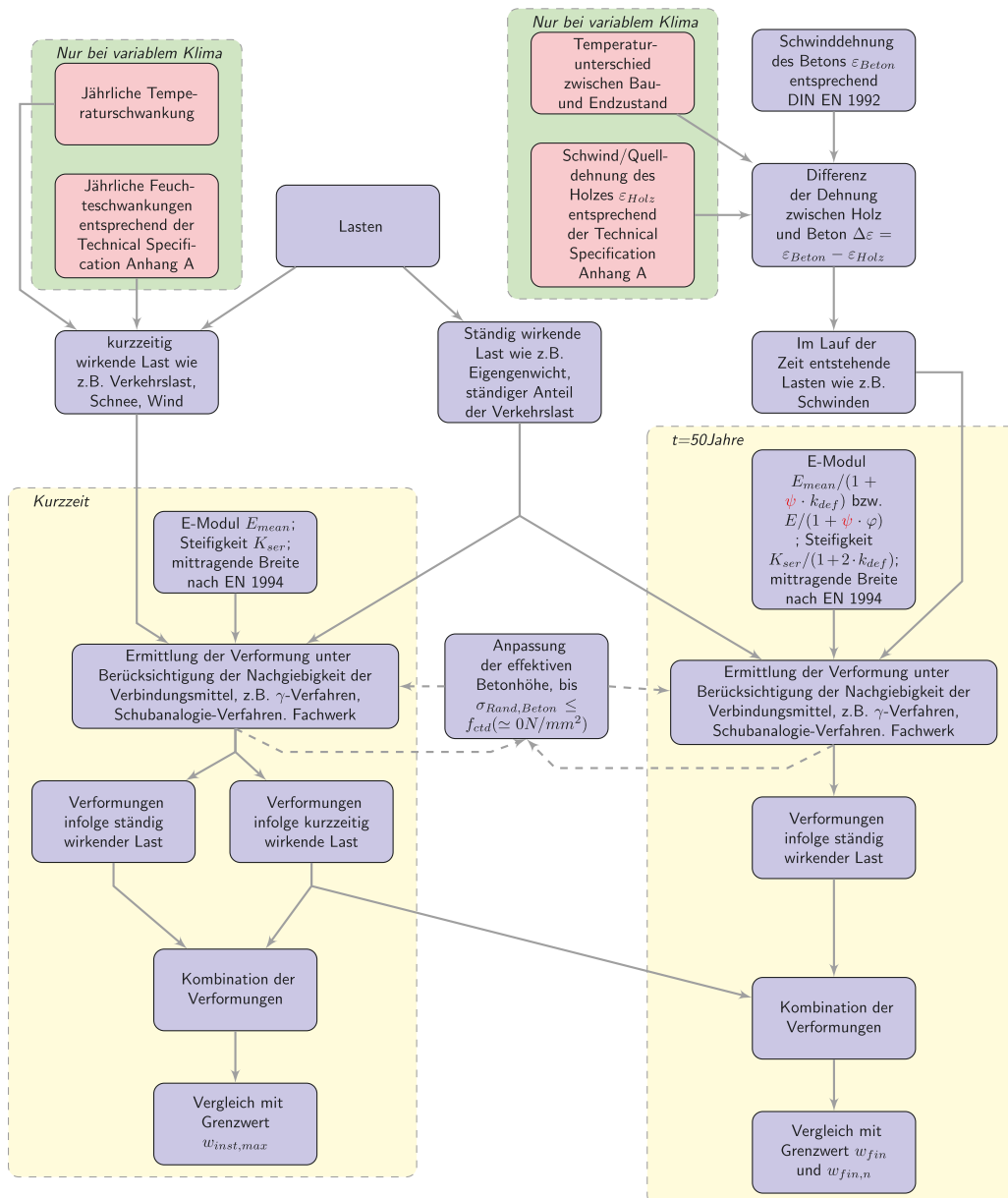


Abbildung 9: Bemessungsablauf für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- **Einwirkung:** In [2] werden die Einwirkungen infolge unterschiedlicher Ausdehnung z.B. durch Temperaturänderung und/oder Feuchteänderungen explizit bestimmt. Damit kann die Bemessung der Bauteile auf die jeweiligen Randbedingungen angepasst werden. Die dafür notwendigen Teilsicherheitsbeiwerte und Modifikationsfaktoren sind gegeben.
- **Berechnungsverfahren:** Ein häufig verwendetes Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel im Verbundträger ist das sog. γ -Verfahren, das in [4] Anhang B geregelt ist. Allerdings kann in diesem Verfahren nicht die unterschiedliche Dehnungen infolge Schwinden, Feuchteänderung und/oder Temperatur abgebildet werden. Daher wird eine Erweiterung dieses Verfahrens eingeführt, bei dem diese Dehnungen in eine Ersatzlast umgewandelt werden können
- **Verbindungsmittel:** In [2] sind im 90° zur Fuge eingebaute, stiftförmige Verbindungsmittel auf Abscheren und Kerven geregelt. Die Kennwerte für die Berechnung wie Verschiebungsmodul und Tragfähigkeit sind zusammengestellt.
- **Langzeitverhalten:** Im Hinblick auf das Langzeitverhalten sind u.U. ein zusätzlicher Zeitraum nachzuweisen und die Auswirkungen der Lastumlagerungen auf die effektive Kriechzahl zu berücksichtigen.

Literatur

- [1] JUNG, P.: Holz-Beton-Verbunddecken in der Praxis und ihre Wirtschaftlichkeit. In: *Holz-Beton-Verbunddecken in Theorie und Praxis*, Hrsg.: Bau und Wissen, CH-Wildegg, 2012
- [2] DIN CEN/TS 19103: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung CEN/TS 19103:2021*. 2022
- [3] DIN CEN/TS 19103/NA: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Berechnung von Holz-Beton-Verbundbauteilen - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung CEN/TS 19103:2021*. Entwurf 2024
- [4] DIN EN 1995-1-1: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010
- [5] DIN EN 1992-1-1: 2010: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010
- [6] DIN EN 1995-2 / NA: 2011 - 08: *Nationaler Anhang - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 2: Brücken*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2011
- [7] DIN EN 1991-1-1: 2010 - 12: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010
- [8] DIN EN 1991-1-5: 2010 - 12: *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen, Temperatureinwirkungen*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010
- [9] DIN EN 1995-1-1 / NA: 2013: *Nationaler Anhang - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines- Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2013
- [10] DIN EN 1990: *Eurocode 0: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [11] FRIES, J.: *Beitrag zum Tragverhalten von Flachdecken mit Hutprofilen*, Institut für Konstruktion und Entwurf Universität Stuttgart (Mitteilung 2001-1), Dissertation, Dezember 2001
- [12] DABAON, M. ; TSCHEMMERNEGG, F. ; HASSEN, K. ; LATEEF, T. A.: Zur Tragfähigkeit von Verbundträgern bei teilweiser Verdübelung. In: *Stahlbau* 62 (1993), S. 3–9
- [13] KREUZINGER, H.: Flächentragwerke: Platten, Scheiben und Schalen; Berechnungsmethoden und Beispiele. In: *Brücken aus Holz* (1999), S. 43–60
- [14] SCHOLZ, A.: Eigenspannungszustände an Verbundquerschnitten infolge von Dehnungsunterschieden Anwendung eines neueren Rechenverfahrens auf einem bewährten Lösungsansatz. In: *Bautechnik* 81 (2004), März, Nr. 3, S. 180–188
- [15] SCHOLZ, A.: *Ein Beitrag zur Berechnung von Flächentragwerken aus Holz*, TU München, Diss., 2003
- [16] GROSSE, M. ; HARTNACK, R. ; LEHMANN, S. ; RAUTENSTRAUCH, K.: Modellierung von diskontinuierlich verbundenen Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. In: *Bautechnik* 80 (2003), S. 534–541 und 693–701
- [17] MICHELFELDER, B.: *Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken*, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Dissertation, 2006. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-28911>
- [18] SCHÄNZLIN, J. ; FRAGIACOMO, M.: Extension of EC5-Annex B formulas for the design of timber-concrete compositestructures. In: *CIB-40-10-1*, 2007 (International council for research and innovation in building and construction– working commission W 18 – timber structures)

- [19] SCHÄNZLIN, J.: *Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Dissertation, 2003
- [20] DIAS, A. ; FRAGIAOCOMO, M. ; HARRIS, R. ; KUKLIC, P. ; RAJICIC, V. ; SCHÄNZLIN, J.: *Technical Specification – Final Draft - Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-3: Structural design of timber concrete composite structures / Project Team CEN/TC 250-SC5.T2*. 2018. – Forschungsbericht
- [21] DIAS, A. ; FRAGIAOCOMO, M. ; HARRIS, R. ; KUKLIC, P. ; RAJICIC, V. ; SCHÄNZLIN, J.: *Hintergrundbericht zur Technical Specification – Final Draft - Eurocode 5: Design of Timber Structures - Part 1-3: Structural design of timber concrete composite structures / Project Team CEN/TC 250-SC5.T2*. 2018. – Forschungsbericht
- [22] DIAS, A. (Hrsg.) ; SCHÄNZLIN, J. (Hrsg.) ; DIETSCH, P. (Hrsg.): *Design of timber-concrete composite structures: A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 4*. Shaker Verlag Aachen, 2018
<https://www.costfp1402.tum.de/home/>
- [23] DIN EN 1994-1-1: 2010: *Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1994-1-1:2004 + AC:2009*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010
- [24] DIN EN 1995-2: 2010: *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 2: Brücken*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010
- [25] JOHANSEN, K. W.: *Theory of timber connections*. 1949
- [26] KUDLA, K.: *Kerven als Verbindungsmittel für Holz-Beton-Verbundstraßenbrücken*, Institut für Konstruktion und Entwurf, Diss., 2017
- [27] DIN EN 1992-4: 2019: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 4: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton; Deutsche Fassung EN 1992-4:2018*. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2019
- [28] KUPFER, H. ; KIRMAIR, H.: *Verformungsmoduln zur Berechnung statisch unbestimmter Systeme aus zwei Komponenten mit unterschiedlichen Kriechzahlen*. In: *Bauingenieur* 62 (1987), S. 371–377
- [29] KREUZINGER, H.: *Verbundkonstruktionen Holz / Beton*. 1994
- [30] BLASS, H.-J. ; EHLBECK, J. ; LINDEN, M. v. d. ; SCHLAGER, M.: *Trag- und Verformungsverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen*. 1995 (T2710)



Neues Werk Cottbus - Zukunft gestalten

Fotocredit: © DB AG

Verbindungen fürs Leben

W&F

WAYSS & FREYTAG
INGENIEURBAU

Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
Bereich Nord
Standort Berlin
Straße der Jugend 58
14974 Ludwigsfelde

Tel. +49 3378 - 519347
ingbau.hamburg@wf-ib.de

www.wf-ib.de [f](#) [@](#) [in](#) [x](#)

Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme

Michael Heckmann, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Christian Glock

RPTU Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
michael.heckmann@rptu.de
christian.glock@rptu.de

Dieser Beitrag wurde bereits in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau unter dem Titel "Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme" unter folgender Autorenschaft veröffentlicht:

Heckmann, M.; Glock, C. (2023) Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme in: Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 2, S. 110–123. <https://doi.org/10.1002/best.202200102>

1. Einleitung

Die international und national beschlossenen umweltpolitischen Ziele zur Begrenzung der Erderwärmung sowie für einen nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen (z. B. [1–3]) haben unmittelbare Auswirkungen auf die Bauwirtschaft. Denn wie aus einer Studie der Vereinten Nationen [4] hervorgeht, tragen der Gebäudesektor und die Bauindustrie mit einem Anteil von 38 % zu den globalen Treibhausgasemissionen bei.

In der Folge wird auch die Stahlbetonbauweise zunehmend kritisch hinterfragt, nicht nur aufgrund der treibhausgasintensiven Herstellung von Zement, die für 8 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist [5], sondern auch wegen der anhaltenden Verknappung von Sand und Gesteinskörnung [6; 7].

Deckensysteme haben mit einem Anteil von knapp 40 % [8; 9] den größten Einfluss auf die tragwerksbedingten Treibhausgasemissionen eines üblichen Hochbaus. Mit einem Marktanteil von mindestens 70 % der Hochbaudecken in Deutschland [10] stellen massive Stahlbetondecken die am weitesten verbreitete Ausführungsvariante dar. Während diese vielfach wirtschaftliche sowie baupraktische Vorteile aufweisen, müssen sie mit Blick auf den Ressourcenbedarf und die Treibhausgasemissionen kritisch hinterfragt werden.

In diesem Beitrag werden daher die Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Deckensysteme in Form ökobilanzieller Ergebnisse miteinander verglichen. Hierbei wird neben den Auswirkungen variierender bilanzieller Randbedingungen auch der Einfluss unterschiedlicher Maßnahmen zur Reduktion des Beton- und/oder Stahlbedarfes auf den Ressourcenverbrauch und die Treibhausgasemissionen quantifiziert. Auf diese Weise soll die Entscheidungsfindung bei der Konzeption von Deckensystemen erleichtert und dabei die Sensitivität verschiedener Einflussfaktoren veranschaulicht werden.

2. Grundlagen der Ökobilanz im Bauwesen

2.1 Allgemeines

Die Zielsetzung eines ökologischen Bauens gewinnt innerhalb der Wertschöpfungskette Bau (Architekten, Fachplaner, ausführende Unternehmen) zunehmend an Relevanz und beeinflusst

vermehrt die Planung und bauliche Umsetzung. Dabei liegt der Fokus meist auf der Bewertung und dem Vergleich von Umweltwirkungen und dem Ressourcenbedarf einzelner Prozesse, Produkte oder Baustoffe. Hierfür bietet die Ökobilanz eine Methode, mithilfe derer eine Vielzahl relevanter Umweltwirkungen quantifiziert werden können. Neben dem Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential, GWP), das mit Blick auf die globale Herausforderung des Klimawandels meist als maßgebende Kenngröße herangezogen wird, zählen u. a. das Ozonabbaupotenzial, das Versauerungspotenzial oder das Wasser-Entzugspotenzial zu den Kernindikatoren einer Ökobilanz im Bauwesen [11]. Darüber hinaus kann z. B. auch der Bedarf an erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie erfasst werden.

Ein Rahmendokument für die Nachhaltigkeitsbewertung im Bauwesen stellt DIN EN 15643 [12] dar. Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit werden wiederum von DIN EN 15978-1 [11] auf Gebäudeebene und von DIN EN 15804 [13] auf Produktebene geregelt. Allgemeine Grundsätze und Rahmenbedingungen sowie Anforderungen und Anleitungen einer Ökobilanz sind in den Normen DIN EN ISO 14040 [14] und DIN EN ISO 14044 [15] enthalten.

2.2 Lebenszyklus(-abschnitte) eines Bauteils oder Bauwerks

Umweltwirkungen und Ressourceneinsätze gehen aus verschiedenen Prozessen während eines Bauwerkslebenszyklus hervor. Mit dem Ziel, diese Prozesse den jeweiligen Lebenszyklusabschnitten eines Bauwerks zuordnen zu können, unterteilen die Normen [11–13] einen Bauwerkslebenszyklus in mehrere Phasen. Entsprechend Abb. 1 wird hierbei zwischen Herstellungs-, Bau-, Nutzungs- und Entsorgungsphase unterschieden, die wiederum in mehrere Module (A1-C4) untergliedert werden. Modul D ermöglicht die Bilanzierung von Gutschriften und Belastungen außerhalb des Lebenszyklus, z. B. aus Recycling- oder Wiederverwendungsprozessen.

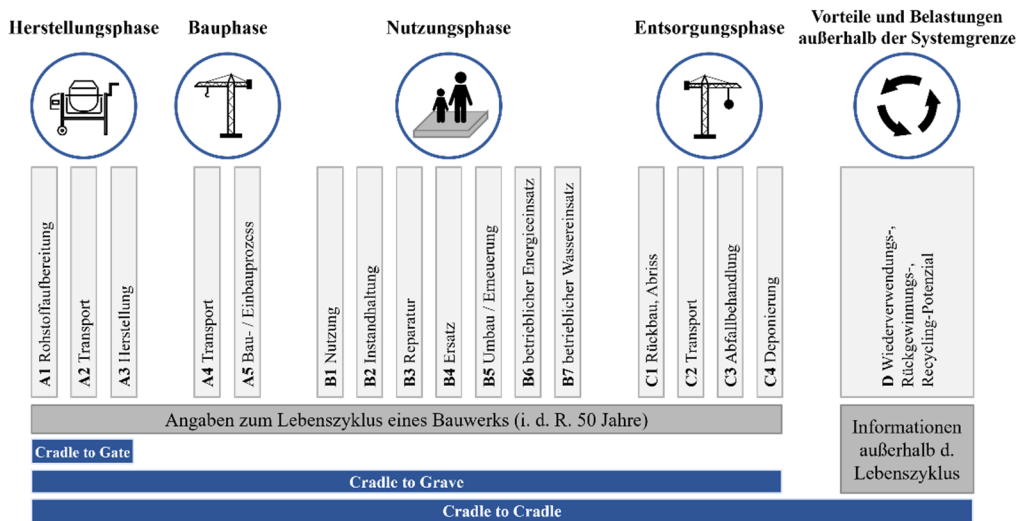


Abb. 1: Lebenszyklusphasen und -module eines Bauwerks nach [13] sowie Darstellung der Lebenszyklusabschnitte Cradle to Gate, Cradle to Grave und Cradle to Cradle

Aufbauend auf diesen Lebenszyklusphasen werden in [11] und [13] zwei grundlegende Bilanzierungsszenarien unterschieden. Das Szenario „Cradle to Gate“ („von der Wiege bis zum Werktor“) erfasst die Herstellungsphase mit den Modulen A1-A3. Entsprechend berücksichtigt es die Aufwendungen aus der Rohstoffbereitstellung, dem Transport sowie der Herstellung des jeweiligen Untersuchungsgegenstands. Die Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus und damit der Herstellungsphase bis zur Entsorgungsphase (Module A1-C4) erfolgt im Szenario „Cradle to Grave“ („von der Wiege bis zur Bahre“).

Mit der zusätzlichen Berücksichtigung von Modul D können je nach betrachtetem Wiederverwendungszenario die Potenziale eines Stoffkreislaufs bilanziert werden. Erfolgt nach Ende

des eigentlichen Lebenszyklus eine verlustfreie Rückführung von Material in einen solchen Stoffkreislauf, wird in der Literatur häufig von „Cradle to Cradle“ gesprochen (z. B. [16; 17]).

Prinzipiell sollte eine Ökobilanz den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes oder Bauteils sowie etwaige Potenziale infolge Wiederverwendung oder Recycling möglichst präzise erfassen. Eine teils unvollständige Datenbasis sowie die zeitliche Diskrepanz zwischen Bilanzierungs- und Eintrittszeitpunkt stellen hierbei allerdings wesentliche Herausforderungen dar und erfordern zudem unsichere Annahmen für den Zeitraum mehrerer Jahrzehnte.

Die geringe zeitliche Abweichung zwischen Bilanzierungs- und Herstellungszeitpunkt lässt darauf schließen, dass die wesentlichen Prozesse der Herstellungsphase (Module A1-A3) realitätsnah erfasst werden können. Aufgrund einer ausgeprägten Datenbasis für diese Module kann zudem häufig auf Annahmen verzichtet werden.

Die Bauphase (Module A4, A5) erfasst die Transportwege zur Baustelle sowie Bau- und Einbauprozesse und ist damit stark abhängig vom Ort der Baustelle und z. B. von der Entscheidung, ob in Fertig-, Halbfertig- oder Ortbetonbauweise gebaut wird. Je nach Planungsstadium lassen sich diese Aspekte häufig allerdings noch nicht mit einer ausreichenden Sicherheit vorhersagen. Hinzu kommt eine teils unvollständige Datenbasis für diese Lebenszyklusphase. Aus diesen Gründen werden die Module A4 und A5 bei Gebäudezertifizierungen z. B. gemäß der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) aktuell nicht berücksichtigt.

Die Nutzungsphase (Module B1-B7) erfasst neben der Nutzung selbst u. a. Instandhaltungs-, Reparatur- und Umbaumaßnahmen sowie den betrieblichen Energie- und Wassereinsatz. Zwar existieren z. B. für die Ermittlung des Energiebedarfes (B6) allgemein anerkannte Regeln der Technik, jedoch bedarf eine Bilanzierung der Nutzungsphase vieler Annahmen mit sehr weitem Zukunftsblick, insbesondere da in der Regel von einem Lebenszyklus von 50 Jahren ausgegangen wird. Auch bei der Bilanzierung dieser Phase sind Planungsstand und Bilanzierungszeitpunkt entscheidend für die Aussagekraft der Ergebnisse.

Die Entsorgungsphase (Module C1-C4) berücksichtigt die Umweltwirkungen infolge Rückbau, Transport, Abfallbehandlung und Deponierung. Vor dem Hintergrund, dass dem Bestandserhalt von Bauwerken eine zunehmende Bedeutung bei der Bewältigung ökologischer Herausforderungen wie Ressourcenknappheit und Treibhausgasemissionen zukommen wird, ist im Allgemeinen von einer nennenswerten zeitlichen Diskrepanz von (mindestens) 50 Jahren zwischen Bilanzierungs- und Entsorgungszeitpunkt auszugehen. Damit einher gehen unsichere Annahmen mit langjährigem Prognosezeitraum für die dann resultierenden Umweltwirkungen.

Außerhalb des eigentlichen Bauwerkslebenszyklus liegende Potenziale und Belastungen sollen über die Bilanzierung von Modul D erfasst werden können. Hierzu zählen insbesondere Recycling- und Wiederverwendungspotenziale, die in der Regel in Form von Gutschriften ausgewiesen werden. Mit Blick auf die ausstehende Zeit bis zur möglichen Realisierung der jeweiligen Potenziale, i. d. R. mehrere Jahrzehnte, sind die hierbei getroffenen Annahmen und Prognosen allerdings stets mit der entsprechenden Unsicherheit zu interpretieren.

Häufig werden Ökobilanzen als Bewertungsinstrument im Rahmen von Gebäudezertifizierungen eingesetzt. Aus diesem Grund bieten diese Zertifizierungen eine Orientierung, welche Lebenszyklusphasen und -module für eine Bilanzierung von Gebäuden sinnvollerweise betrachtet werden können. Tab. 1 stellt diese für das System der DGNB, das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), die Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (BREEAM) und das Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) gegenüber. Während die Herstellungsphase sowie die Module C3 und C4 in allen Zertifizierungssystemen berücksichtigt werden, gibt es Abweichungen bei der Bilanzierung der Bau- und

Nutzungsphase. Modul D fließt nur bei einer Zertifizierung durch das DGNB-System in das Ergebnis einer Ökobilanz ein.

Tab. 1: Übersicht über die bilanzierten Lebenszyklusphasen in BNB- [18], BREEAM- [19], DGNB- [20] und LEED-Zertifizierungen [21]

	Herstellungsphase			Bauphase		Nutzungsphase							Entsorgungsphase				D
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	
BNB	X	X	X	-	-	-	-*	-	-*	-	X	-	-	-	X	X	-
BREEAM	X	X	X	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	X ¹⁾	-
DGNB	X	X	X	-	-	-	-	-	-*	-	X	-	-	-	X	X	X
LEED	X	X	X	X	-	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	X ²⁾	-	-	X ³⁾	X ³⁾	X ³⁾	X ³⁾	-

* Bilanzierung im Falle eines Austauschs von Produkten während der Betrachtungsdauer. Bilanziert die Herstellung und Entsorgung der Produkte, jedoch nicht den Austauschprozess selbst.

¹⁾ Soll bilanziert werden, wenn es im verwendeten Bilanzierungstool möglich ist.

²⁾ Mindestens ein Modul aus B1-B5 muss berücksichtigt werden.

³⁾ Mindestens ein Modul aus C1-C4 muss berücksichtigt werden.

2.3 Datengrundlage

Als Datengrundlage ökobilanzieller Untersuchungen dient in Deutschland im Wesentlichen die ÖKOBAUDAT [22] des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) in der Version 2021-II mit den Datensätzen gemäß EN 15804+A1 und A2. Sie stellt eine konsistente Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken dar [23] und enthält über 1400 Datensätze mit Angaben zu den Umweltwirkungen von z. B. Materialien, Produkten und Prozessen. Hierbei kann vereinfacht zwischen folgenden Datensatztypen unterschieden werden [23]:

- **Herstellerspezifische Datensätze:** Enthalten Daten, die repräsentativ für das konkrete Produkt eines Herstellers bzw. Werkes sind. Diese Daten beruhen meist auf Umweltproduktdeklarationen (engl.: Environmental Product Declarations, EPD)
- **Durchschnittsdatsätze:** Stellen z. B. den Durchschnitt einer Branche, mehrerer Firmen oder eines Industrieverbandes dar.
- **Repräsentative Datensätze:** Enthalten repräsentative Daten für eine Region oder ein Land.
- **Generische Datensätze:** Informationen aus der Literatur oder Expertenwissen, die nicht auf einer Modellierung von Industriedaten beruhen. Da diese Datensätze nicht extern verifiziert wurden, werden sie mit einem Sicherheitszuschlag von 10 – 30 % versehen [23].

Während für einige Materialien mehrere Datensätze vorliegen, enthält die ÖKOBAUDAT z. B. keine Daten für Spannstahl. Aus diesem Grund wird im Zuge der nachfolgenden eigenen Untersuchungen zudem auf EPDs außerhalb der ÖKOBAUDAT zurückgegriffen.

Neben der ÖKOBAUDAT und den bereits erwähnten EPDs verschiedener nationaler und internationaler Hersteller stehen weitere Datenbanken wie z. B. die ecoinvent (Schweiz) [24] oder die ICE Database (UK) [25] für die Ökobilanzierung von Bauteilen und Bauwerken zur Verfügung. Da Ökobilanzen in Deutschland vorwiegend auf Basis der ÖKOBAUDAT erstellt werden, bleiben die Datensätze der anderen Datenbanken an dieser Stelle unberücksichtigt.

2.4 Besonderheiten bei der Treibhausgasbilanzierung von Holz

Der nachwachsende Baustoff Holz wird vielfach mit ökologischem Bauen in Verbindung gebracht [26] und verstärkt auch anstelle von Beton und Stahl eingesetzt. Hintergrund ist insbesondere die Eigenschaft des Holzes, während seines Wachstums Kohlenstoff zu speichern

und diesen bis zu seiner Verrottung oder energetischen Verwertung zu binden. Mithilfe von Abb. 2 (links) wird nachfolgend beschrieben, wie diese Eigenschaft bilanziell berücksichtigt werden kann.

Der vom Holz gespeicherte Kohlenstoff (biogener Kohlenstoff) kann nach [13] auf ein CO₂-Äquivalent umgerechnet und während der Herstellungsphase (Module A1-A3) in Form negativer Emissionen ausgewiesen werden. Hierbei ist zu beachten, dass das CO₂-Äquivalent des biogenen Kohlenstoffs in den Ergebnissen einer Ökobilanz getrennt von fossilen Emissionen deklariert werden muss [13]. Überschlägig ergibt sich für 1 kg gedarrtes Holz eine gespeicherte Masse von ca. 0,5 kg Kohlenstoff, der wiederum einem CO₂-Äquivalent von ca. 1,84 kg CO₂ entspricht (1 kg C \cong 44/12 kg CO₂).

In der Entsorgungsphase wird von einer Freigabe des gesamten biogenen Kohlenstoffs infolge Verrottung oder energetischer Verwertung des Holzes ausgegangen. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (Module A-C) von Holz ergeben sich somit keine ökobilanziellen Vorteile aus dem biogenen Kohlenstoff.

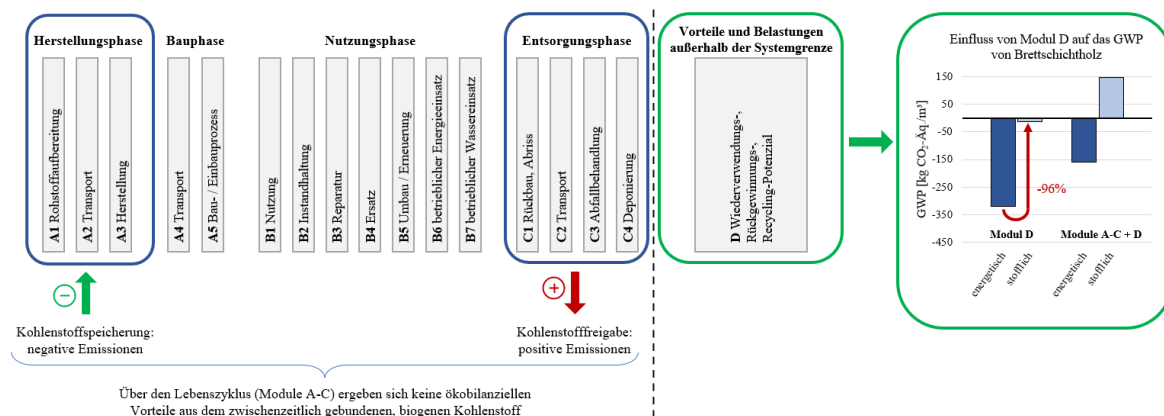


Abb. 2: Bilanzierung des biogenen Kohlenstoffs von Holz über den Lebenszyklus (links) und Einfluss einer energetischen und stofflichen Verwertung von Holz in Modul D (rechts) [27]

Ökobilanzielle Potenziale einer energetischen Verwertung oder stofflichen Weiterverwendung der Holzprodukte im Anschluss an den eigentlichen Bauwerkslebenszyklus können im Rahmen einer Bilanzierung von Modul D erfasst werden. Daraus resultierende Gutschriften unterscheiden sich für die genannten Szenarien mit Blick auf das GWP signifikant. Die energetische Verwertung als Standardfall der aktuellen Bilanzierungsmethodik und Baupraxis wird um ein Vielfaches höher bewertet als eine stoffliche Weiterverwendung. Abb. 2 (rechts) verdeutlicht dies am Beispiel von 1 m³ Brettschichtholz [27]: Eine Bilanzierung der energetischen Verwertung in Modul D führt zu einer Gutschrift von -319,1 kg CO₂-Äq./m³ während die stoffliche Verwertung mit -13,3 kg CO₂-Äq./m³ berücksichtigt wird. Die resultierende Abweichung beträgt 96 %. Wird das GWP von Brettschichtholz für den gesamten Lebenszyklus und unter Berücksichtigung von Modul D bilanziert (Module A-C, D), resultiert in Abhängigkeit des gewählten Verwertungszenarios ein negatives (160,3 kg CO₂-Äq./m³, energetische Verwertung) oder positives GWP (145,5 kg CO₂-Äq./m³, stoffliche Weiterverwendung). Folglich kann durch das gewählte Szenario nennenswert Einfluss auf die Gesamtbilanz von Holzprodukten genommen werden, sofern Modul D direkt in die ökobilanzielle Bewertung einfließt.

Die Gutschriften für eine energetische Verwertung von Holz resultieren aus der Annahme, hiermit eine Energie- bzw. Stromversorgung mittels Erdgas bzw. aktuellem Strommix kompensieren zu können. Da hiervon am Ende des Lebenszyklus eines heute geplanten Bauwerkes aufgrund voranschreitender Entwicklungen im Bereich der Energie- und Stromversorgung allerdings nicht

auszugehen ist, resultieren aus der Bilanzierung der energetischen Verwertung Fehlanreize für den ineffizienten Einsatz von Holz, die es kritisch zu hinterfragen gilt. Vielmehr ist aus heutiger Sicht die Wiederverwendung von Materialien und damit das Szenario der stofflichen Verwertung anzustreben, welches einen tatsächlichen Mehrwert für den effizienten Einsatz von Ressourcen und Cradle-to-Cradle-Ansätze darstellt.

3. Gegenüberstellung der Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Deckensysteme

3.1 Allgemeines

Die Ökobilanz eines Deckensystems kann anhand einer Vielzahl von Indikatoren erfolgen, mit Blick auf den Klimawandel als globale Herausforderung kommt den Treibhausgasemissionen jedoch eine besondere Rolle zu. Im Sinne einer Unterstützung der Entscheidungsfindung für die Wahl von Deckensystemen wird nachfolgend eine vergleichende Gegenüberstellung praxisüblicher Deckensysteme auf Basis des GWPs je Quadratmeter Rohbaudeckenfläche dargestellt. Hierbei werden die in Abb. 3 dargestellten Deckensysteme berücksichtigt. Um darüber hinaus auch potenzielle Auswirkungen des gewählten zeitlichen Bilanzierungsrahmens oder variierender Datensätze darstellen zu können, werden die Einflüsse dieser Aspekte zunächst am Beispiel der Stahlbetonmassivdecke (1) und der Holz-Beton-Verbund-Rippendecke (5) untersucht.

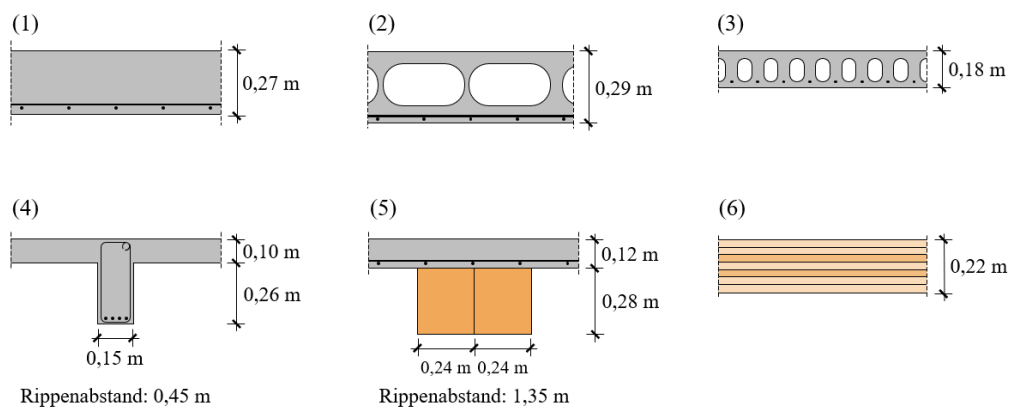


Abb. 3: Betrachtete Deckenquerschnitte: (1) Stahlbetonmassivdecke, (2) Hohlkörperdecke, (3) Spannbetonhohldiele, (4) Stahlbeton-Rippendecke, (5) Holz-Beton-Verbund-Rippendecke, (6) Brettsperrholzdecke

Die dargestellten Querschnitte resultieren aus den Anforderungen eines Holzhybrid-Bürogebäudes, welches im Rahmen der Untersuchungen in [26] betrachtet wurde. Die statischen Randbedingungen für die betrachteten Geschossdeckensysteme werden in Tab. 2 aufgeführt. Zudem erfüllen alle Deckensysteme die Anforderungen einer 90-minütigen Feuerwiderstandsdauer. Da sowohl die flankierenden Bauteile als auch etwaige Ausführungen eines Fußbodenaufbaus außerhalb des Untersuchungsrahmens liegen, erfolgt kein Nachweis der Schallschutzeigenschaften. Allerdings können die betrachteten Deckensysteme die Mindestschallschutzanforderung nach DIN 4109-1 [28] unter Einsatz üblicher Fußbodenaufbauten erfüllen.

Um eine klar abgrenzbare Bewertungsgrundlage zu schaffen, werden lediglich die an den maßgebenden Bemessungspunkten ermittelten, statisch erforderlichen Materialmengen in den Bilanzierungsergebnissen berücksichtigt. Einflüsse aus konstruktiven Maßnahmen oder Übergreifungsstößen werden in diesen Untersuchungen nicht betrachtet, sind für die Bilanzierung eines Gesamtgebäudes allerdings von Relevanz.

Tab. 2: Statische Randbedingungen zur Bestimmung der erforderlichen Deckenquerschnitte

Statik		Belastungssituation	
Statisches System	stat. best. Einfeldträger	Eigenlast	abh. von Deckensystem
Spannrichtung	Einachsig gespannt	Ausbaulast	1,60 kN/m ²
Spannweite	6,00 m	Nutzlasten	3,50 kN/m ²

Die eigenen Angaben und Ergebnisse sind demzufolge als untere Richtwerte für die Treibhausgasemissionen der betrachteten Deckensysteme zu interpretieren. Tab. 3 führt die ermittelten Materialmengen auf.

Tab. 3: Materialeinsatz der Deckensysteme je m² Rohbaudeckenfläche

Material	Einheit	Materialeinsatz der Deckensysteme je m ²					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Beton C25/30	m ³	0,27	0,21	-	0,19	-	-
Beton C30/37	m ³	-	-	-	-	0,12	-
Beton C50/60	m ³	-	-	0,10	-	-	-
Bewehrungsstahl	kg	7,95	6,38	-	8,01	3,02	-
Spannstahl	kg	-	-	3,04	-	-	-
Brettschichtholz	m ³	-	-	-	-	0,10	-
Brettsperrholz	m ³	-	-	-	-	-	0,22
Verbindungsmittel	kg	-	-	-	-	0,97	-

Der Materialeinsatz des Polypropylens für die Hohlkörper der Hohlkörperdecke wurde nicht quantifiziert. Die Bestimmung des GWPs erfolgt anteilig an den Gesamtemissionen des Deckensystems.

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, wurden die Umweltwirkungen in den eigenen Untersuchungen auf Basis von ÖKOBAUDAT-Datensätzen sowie ergänzenden EPDs bestimmt. Tab. 4 zeigt die Summe des GWPs der verwendeten Materialien je Referenzeinheit für die Lebenszyklusmodule A1-A3, C3 und C4. Zur Veranschaulichung der Sensitivität der Eingangsdaten fasst Abschnitt 3.3 die eigenen Untersuchungen zum Einfluss der unterschiedlichen Datensätze auf das Ergebnis einer Ökobilanz zusammen. Hierfür werden den Materialien Beton C25/30, Beton C30/37, Bewehrungsstahl und Brettschichtholz je zwei unterschiedliche Werte für das GWP zugewiesen. Der erstgenannte Wert entspricht dabei i. d. R. einem Durchschnittswert für Deutschland, während der zweitgenannte Wert einer alternativen Datengrundlage wie z. B. hersteller-spezifischen Datensätzen entnommen wurde. Die berücksichtigten Werte zielen nicht darauf ab, extremale Grenzwerte auszuloten. Vielmehr handelt es sich hierbei um wissenschaftlich begründbare Angaben, die eine derzeit nahezu unvermeidbare Schwankungsbreite der Bilanzierungsergebnisse repräsentieren.

3.2 Einfluss der betrachteten Lebenszyklusphasen

Der Einfluss der betrachteten Lebenszyklusphasen und -module auf das Bilanzierungsergebnis wird nachfolgend beispielhaft für eine Stahlbetonmassivdecke sowie eine Holz-Beton-Verbunddecke (HBV-Decke) dargestellt. Die eigenen Untersuchungen orientieren sich dabei an den berücksichtigten Modulen des DGNB-Systems (s. Tab. 1), welches in Deutschland am weitesten verbreitet ist [44]. Unter der Annahme, dass die in der Nutzungsphase bilanzierten Module, also insbesondere der Austauschzyklus (Modul B4), unabhängig vom betrachteten Deckensystem sind, wird für den durchgeführten Vergleich auf die Berücksichtigung dieser Lebenszyklusphase verzichtet.

Tab. 4: GWP der verwendeten Materialien für die Lebenszyklusmodule A1-A3, C3, C4

Material	Bezugsgröße	GWP [kg CO ₂ -Äq.]	
		Durchschnitt	Alternativ
Beton C25/30	1 m ³	203 [29]	272 ¹⁾
Beton C30/37		225 [30]	299 [31]
Beton C50/60		306 [32]	
Bewehrungsstahl	1 kg	0,7 [33]	1,1 [34]
Spannstahl		2,6 ²⁾	
Brettschichtholz	1 m ³	152 [27]	110 [35]
Brettspertholz		134 [36]	
Verbindungsmitel	1 kg	2,4 [37]	
Polypropylen (Hohlkörper)	Anteilig an Gesamtbilanz Hohlkörperdecke	1,5 % [38]	

¹⁾ Mittelwert aus [31; 39] ²⁾ Mittelwert aus [40–43]

Folgenden Szenarien werden betrachtet:

- Szenario H: Herstellung (Module A1-A3)
- Szenario H+E: Herstellung und Entsorgung (Module A1-A3, C3, C4)
- Szenario H+E+W: Herstellung, Entsorgung sowie Wieder- und Weiterverwendung (Module A1-A3, C3, C4, D)

Abb. 4 stellt das GWP der beiden betrachteten Rohbaudeckensysteme für die drei genannten Szenarien je Quadratmeter Deckenfläche dar.

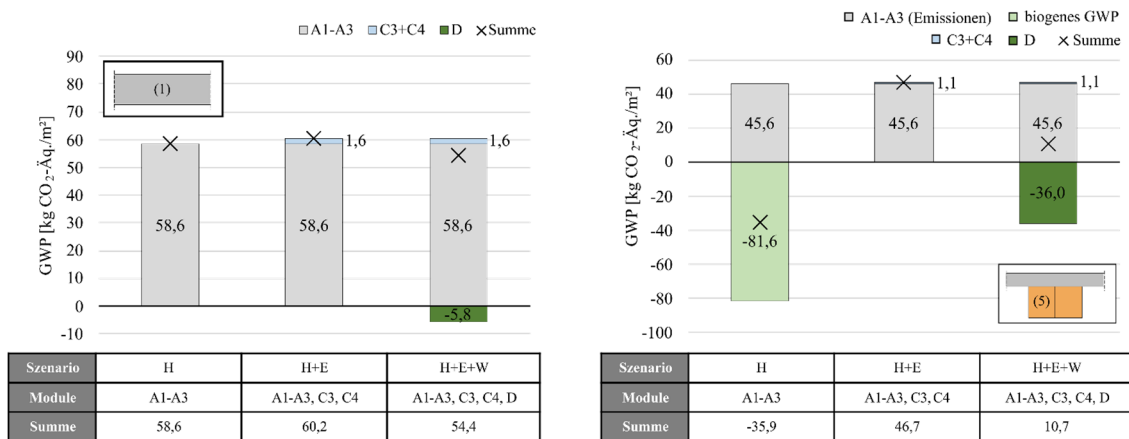


Abb. 4: Einfluss der bilanzierten Lebenszyklusphasen auf das GWP der Stahlbetonmassivdecke (links) und Holz-Beton-Verbund-Rippendecke (rechts)

Aus der Darstellung der betrachteten Lebenszyklusphasen einer Stahlbetonmassivdecke wird deutlich, dass die Herstellungsphase (Module A1-A3) einen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis einer Bilanzierung der Treibhausgasemissionen hat. Mit einem GWP von 58,6 kg CO₂ Äq./m² beträgt der Anteil ca. 97 % der Emissionen, die sich aus Szenario H+E ergeben (60,2 kg CO₂-Äq./m²). Entsprechend ist der Anteil der Module C3 und C4 mit 3 % sehr gering. Die mögliche Gutschrift in Modul D liegt mit einem Wert von 5,8 kg CO₂-Äq./m² auf einem Niveau von weniger

als 10 % der Emissionen aus Szenario H+E. In Summe ergibt sich daraus ein GWP von 54,4 kg CO₂-Äq./m² für Szenario H+E+W.

Wird der im Holz gespeicherte, biogene Kohlenstoff während der Herstellungsphase in Form negativer Emissionen berücksichtigt, weist die HBV-Decke in Szenario H ein negatives GWP in Höhe von 35,9 kg CO₂-Äq./m² auf. Entsprechend werden die Emissionen aus der Herstellung des Deckensystems bei dieser Betrachtungsweise durch den biogenen Kohlenstoff überkompensiert. Während der Entsorgungsphase wird von einer Freisetzung des biogenen Kohlenstoffs ausgegangen, weshalb die Gutschrift im Szenario H+E entfällt. Emissionen aus der Abfallbehandlung des Holzes fallen in Höhe von 1,1 kg CO₂-Äq./m² an. Für Szenario H+E ergibt sich damit in Summe ein GWP von 46,7 kg CO₂-Äq./m². Die Gutschrift aus Modul D wurde für den bilanziellen Standardfall einer energetischen Verwertung von Holz ermittelt und beträgt unter Berücksichtigung aller Komponenten der HBV-Decke -36 kg CO₂-Äq./m² und damit mehr als 75 % der Emissionen aus Szenario H+E. In Summe liegt das GWP der HBV-Decke für das Szenario H+E+W bei 10,7 kg CO₂-Äq./m².

Anhand der vorgestellten Untersuchungen kann der Einfluss der betrachteten Lebenszyklusphasen verdeutlicht werden. Der wesentliche Anteil der fossilen Treibhausgasemissionen resultiert für die hier betrachteten Szenarien prinzipiell aus der Herstellung der Deckensysteme, während die Auswirkungen der Entsorgungsphase gering sind. Durch die Berücksichtigung des biogenen Kohlenstoffs weichen die GWP-Summen der HBV-Decke für die Szenarien H sowie H+E dennoch stark voneinander ab (vgl. Abschnitt 2.4). Während die Treibhausgasemissionen der Herstellungsphase mit verhältnismäßig hoher Genauigkeit vorausgesagt werden können, müssen bei der Bilanzierung der Entsorgungsphase z. T. unsichere Annahmen getroffen werden.

3.3 Einfluss der gewählten Datengrundlage

Bereits in Abschnitt 2.3 wurde beschrieben, dass allein die ÖKOBAUDAT z. T. mehrere Datensätze für den gleichen Baustoff bereithält. Der potenzielle Einfluss der jeweils verwendeten Datensätze auf das Ergebnis einer Ökobilanz wird nachfolgend exemplarisch am Beispiel der Stahlbetonmassivdecke und der HBV-Decke untersucht. Die verwendeten Daten können Tab. 4 entnommen werden. Dabei wird nicht das Ziel verfolgt, Grenzwerte zu erfassen, sondern vielmehr die unvermeidbare Schwankungsbreite wissenschaftlich fundierter Werte darzustellen. Die Ergebnisse werden in Abb. 5 jeweils getrennt für Szenario H+E (Module A1-A3, C3, C4) und Szenario W (Modul D) ausgewiesen und entsprechend der Anteile der einzelnen Materialien unterteilt.

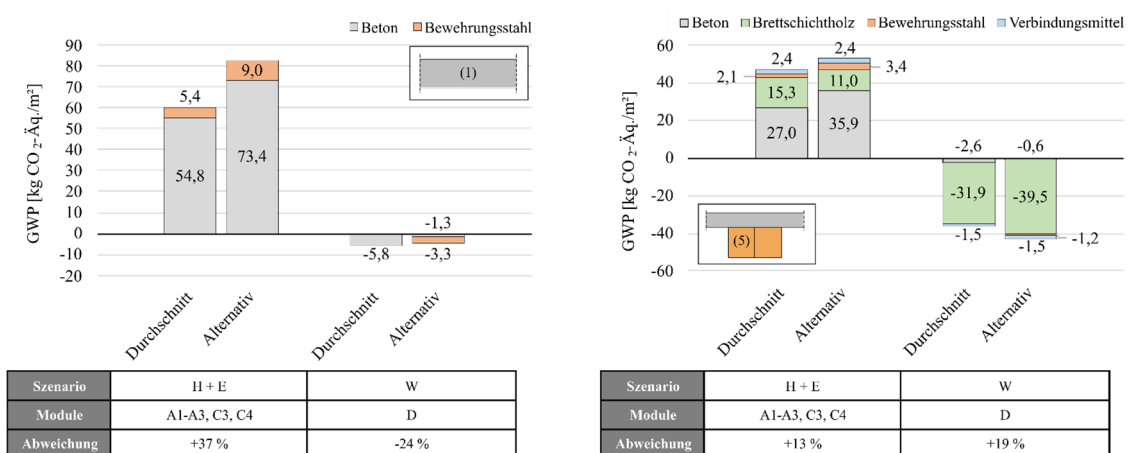


Abb. 5: Beispielhafte Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Datensätze auf das GWP der Stahlbetonmassivdecke (links) und Holz-Beton-Verbund-Rippendecke (rechts)

Bei der Untersuchung der Stahlbetonmassivdecke resultiert aus dem Ansatz unterschiedlicher Datensätze für das Szenario H+E eine Gesamtabweichung des GWPs von 37 %. Die Datensätze des Betons weichen dabei um 34 %, die des Bewehrungsstahls um 67 % voneinander ab. Die starke Abweichung der beiden Stahldatensätze ist u. a. auf die Anteile von Primär- und Sekundärmaterial zurückzuführen. Während dem Durchschnittswert eine für Deutschland charakteristische Herstellung aus 100 % Sekundärmaterial und damit Stahlschrott im Elektroofen zugrunde liegt, berücksichtigt der alternative Datensatz für Baustahl einen für mehrere Stahlwerke in der EU repräsentativen Anteil von 26 % Primärmaterial, das im Hochofen mit einem entsprechend höheren Aufwand zu Stahl verarbeitet wird. Auf diese Weise wird deutlich, welchen Einfluss die Ausgangsmaterialien auf die Umweltwirkungen des jeweiligen Materials haben. Tab. 5 führt für beide Datensätze die Anteile der Materialien an den Gesamtemissionen auf.

Tab. 5: Prozentuale Anteile der Materialien am Gesamt-GWP der Stahlbetonmassivdecke

Material	Durchschnitt	Alternativ
Beton	89 %	91 %
Bewehrungsstahl	11 %	9 %

Die Gutschriften in Modul D unterscheiden sich mit $-5,8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ und $4,6 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ vergleichsweise wenig. Der Durchschnittswert berücksichtigt keine Gutschrift für das Recycling des Bewehrungsstahls, da bereits von einer Herstellung aus 100 % Sekundärmaterial ausgegangen wird.

Für das Beispiel der HBV-Decke ergeben sich aus der Variation der Datensätze Abweichungen in Höhe von ca. 13 % im Szenario H+E. Die Abweichungen der verwendeten Datensätze für Brettschichtholz betragen 28 % zugunsten des alternativen Datensatzes. Die Abweichungen der Daten für Beton und Bewehrungsstahl liegen in der Größenordnung der voranstehenden Gegenüberstellung der Stahlbetonmassivdecke. Für die Bilanzierung der Verbindungsmittel wurde aufgrund einer begrenzten Datenbasis kein alternativer Datensatz herangezogen.

Die Anteile der Materialien am Gesamt-GWP werden in Tab. 6 aufgeführt. Auch im Fall der HBV-Decke resultiert der Großteil der Emissionen aus dem Beton.

Tab. 6: Prozentuale Anteile der Materialien am Gesamt-GWP der HBV-Decke

Material	Durchschnitt	Alternativ
Beton	58 %	68 %
Holz	33 %	21 %
Bewehrungsstahl	4 %	6 %
Verbindungsmittel	5 %	5 %

Die Gutschriften aus Modul D betragen $-36 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ (Durchschnitt) und $42,8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^2$ (Alternativ) und liegen mit jeweils ca. 80 % des Gesamt-GWPs aus Szenario H+E auf einem hohen Niveau. Grund hierfür sind nennenswerte Gutschriften für die energetische Verwertung des Holzes.

Die in diesem Abschnitt durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen die Sensitivität der Ökobilanzergebnisse gegenüber der gewählten Datengrundlage und den damit getroffenen Annahmen u. a. hinsichtlich Herstellprozessen und Materialzusammensetzungen. Insbesondere

die Analyse der Materialien Beton und Bewehrungsstahl verdeutlicht große potenzielle Abweichungen. Der Klinkeranteil im Beton und die Menge des eingesetzten Roheisens bei der Stahlherstellung sind maßgebende Einflussgrößen, die bei der Bewertung eines expliziten Bauvorhabens möglichst zutreffend erfasst werden müssen. Zu den Voraussetzungen hierfür zählen ein vorangeschrittener Planungsstand sowie das Vorhandensein von EPDs der jeweiligen Hersteller verbunden mit einer durchgängigen Qualitätskontrolle. Bei Verwendung der ÖKO-BAUDAT-Datensätze von Beton und Bewehrungsstahl ist es bisher nicht möglich, die Abweichungen der Umweltwirkungen von Produkten unterschiedlicher Hersteller zu erfassen.

3.4 Gegenüberstellung der untersuchten Deckensysteme

Den Schwerpunkt der eigenen Untersuchungen bildet die Analyse der Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. Hierbei werden die drei Szenarien H, H+E sowie H+E+W (s. Abschnitt 3.2) unterschieden.

Abb. 6 zeigt die Ergebnisse aus Szenario H getrennt für die einzelnen Deckensysteme sowie die verwendeten Materialien und den im Holz gespeicherten, biogenen Kohlenstoff. Aus dieser isolierten Betrachtung der Herstellungsphase geht hervor, dass die Stahlbetonmassivdecke aufgrund der großen Betonmengen mit knapp 60 kg CO₂-Äq./m² das größte GWP aufweist. Zudem wird deutlich, dass durch das Vorsehen von Hohlräumen oder Betonrippen sowie das Vorspannen von Deckenbauteilen eine Reduktion der erforderlichen Betonmenge erreicht werden kann. Im betrachteten Fall reduziert sich das GWP verglichen mit der Stahlbetonmassivdecke durch diese Maßnahmen um ca. 25 %. So liegt das GWP der ressourcenverbesserten Massivbau-Deckensysteme auf einem Niveau zwischen ca. 43 kg CO₂-Äq./m² und 46 kg CO₂-Äq./m².

Die Ergebnisse der HBV-Rippendecke sowie der Brettsperrholzdecke weisen eine starke Abhängigkeit vom Ansatz des biogenen Kohlenstoffs auf. Wird dieser bei der Ermittlung des GWPs für Szenario H berücksichtigt, resultieren in beiden Fällen negative Werte. Aufgrund des höheren Holzeinsatzes liegt der Wert der Brettsperrholzdecke (-144,8 kg CO₂-Äq./m²) deutlich unter dem Wert der HBV-Decke (-35,9 kg CO₂-Äq./m²). Sollen Entscheidungen im Planungsprozess eines Gebäudes auf Basis einer ökobilanziellen Bewertung der Herstellungsphase getroffen werden, würde durch die Berücksichtigung des biogenen Kohlenstoffs in Form eines negativen GWPs allerdings ein verschwenderischer Einsatz von Holz belohnt werden, z. B. bei überdimensionierten Holzquerschnitten. Aufgrund der Tatsache, dass neben Sand und Gesteinskörnung auch der Werkstoff Holz nur begrenzt verfügbar ist, stünde eine solche Bewertung dem Ziel der Ressourcenschonung entgegen. Daher wird für diese isolierte Betrachtungsweise empfohlen, den biogenen Kohlenstoff bei der Ermittlung des GWPs nicht mit fossilen GWPs zu verrechnen, sondern separat auszuweisen (vgl. auch [45] und [46]).

Die Ergebnisse aus den GWP-Berechnungen ohne eine Berücksichtigung des biogenen Kohlenstoffs werden daher ebenfalls angegeben (Abb. 6, Werte in Klammern). Für diesen Fall liegt das GWP der HBV-Rippendecke mit ca. 45 kg CO₂-Äq./m² in der Größenordnung der ressourcenverbesserten Massivbau-Deckensysteme, das der Brettsperrholzdecke bei ca. 30 kg CO₂-Äq./m².

Abb. 7 zeigt die Ergebnisse aus Szenario H+E. Die Gegenüberstellung mit Abb. 6 verdeutlicht, dass eine Berücksichtigung der Entsorgungsphase lediglich einen geringen Einfluss auf das GWP der Massivbau-Deckensysteme hat und bestätigt damit die Erkenntnisse aus Abschnitt 3.2. Die Abweichungen dieser Deckensysteme zwischen den beiden Szenarien liegt bei 1,6 - 2,8 % und ist damit in den vorliegenden Untersuchungen als vernachlässigbar anzusehen. Für den Fall, dass der biogene Kohlenstoff in Szenario H berücksichtigt wird, unterscheiden sich die GWP-

Summen der HBV-und Brettsperrholzdecke zwischen beiden Szenarien deutlich. Bleibt der biogene Kohlenstoff in Szenario H unberücksichtigt, beträgt die Abweichung 2,4 bzw. 2,8 %.

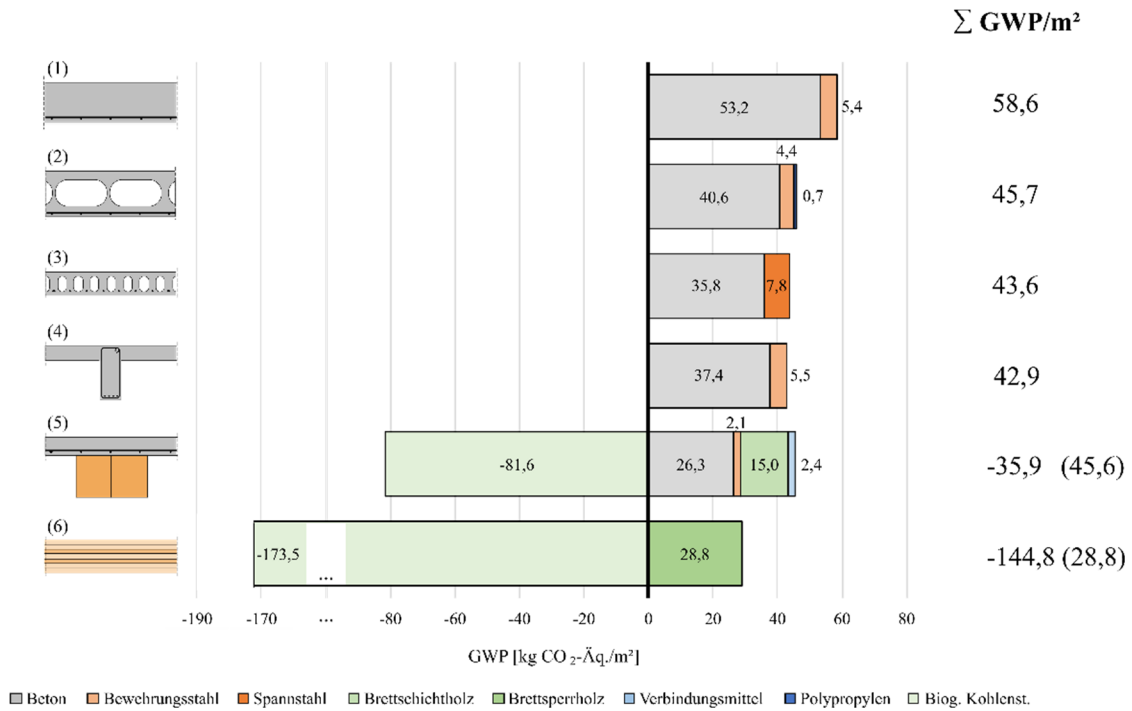


Abb. 6: GWP der betrachteten Deckensysteme (1) bis (6) für Szenario H - Herstellung (Module A1-A3)

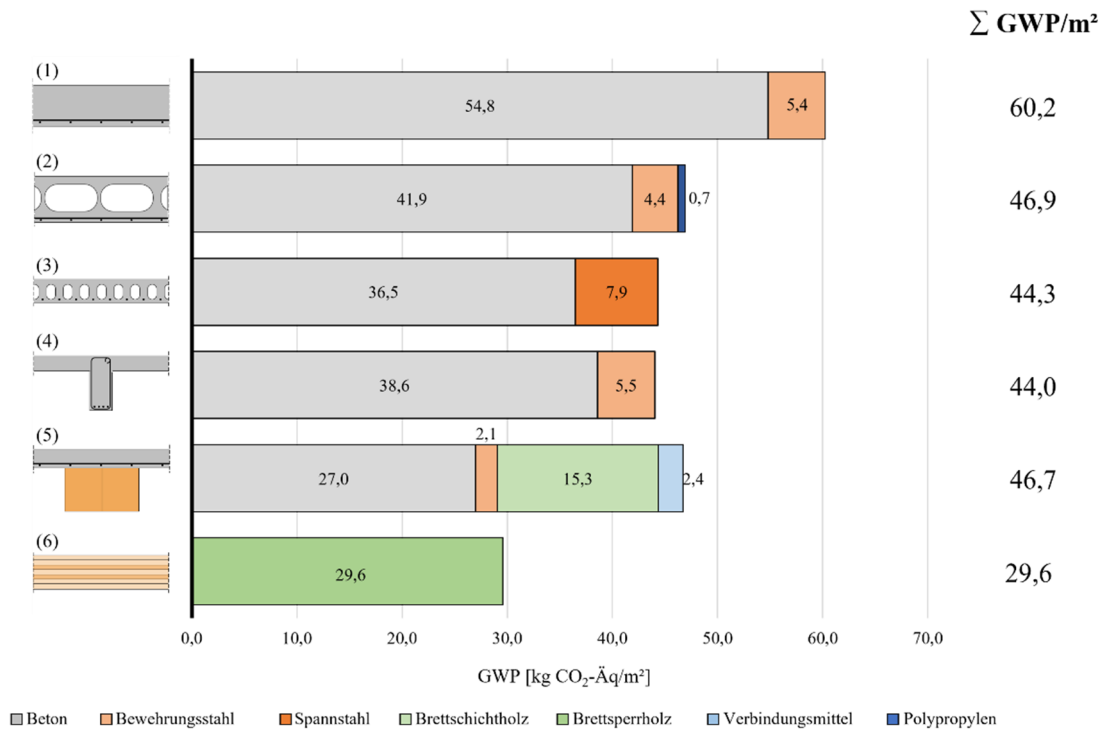


Abb. 7: GWP der betrachteten Deckensysteme (1) bis (6) für Szenario H+E - Herstellung und Entsorgung (Module A1-A3, C3, C4)

Einflüsse aus Wiederverwertungs- und Recyclingpotenzialen und damit aus Modul D haben in dieser Gegenüberstellung z. T. signifikante Auswirkungen auf die Bilanzierungsergebnisse.

Abb. 8 stellt die Ergebnisse für das Szenario H+E+W dar. Während die Ergebnisse der Betondecken verglichen mit Szenario H+E nur um ca. 10 % reduziert werden, resultieren aus der Annahme einer energetischen Verwertung des Holzes nennenswerte Gutschriften für die Holzbestandteile eines Bauteils (vgl. Abschnitt 2.4). In der Folge beträgt das GWP der HBV-Decke für diesen Fall mit 10,7 kg CO₂-Äq./m² nur lediglich ein Viertel der ressourcenreduzierten Betondecken und ein Fünftel der Stahlbetonmassivdecke. Die Brettsperrholzdecke verursacht in Summe ein negatives GWP und kompensiert durch die energetische Verwertung des Holzes demnach bilanziell eine größere Menge an Treibhausgasemissionen als während der Herstellung und Entsorgung des Deckensystems emittiert werden. Sie verursacht damit in allen betrachteten Szenarien das geringste GWP.

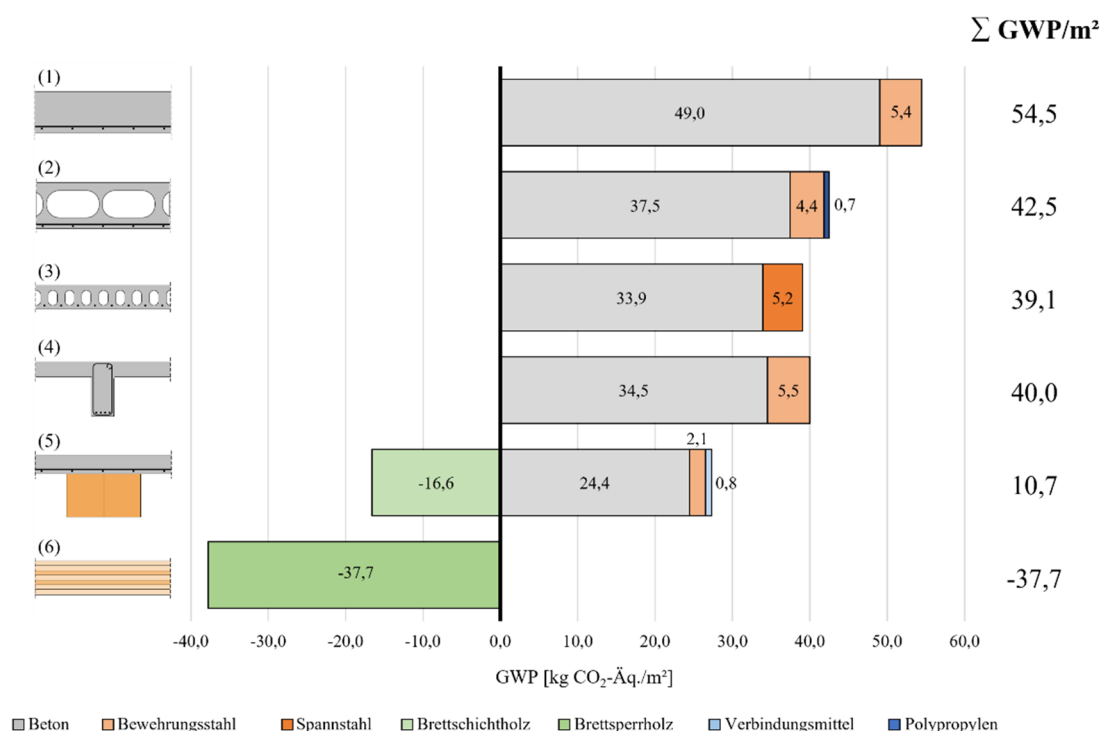


Abb. 8: GWP der betrachteten Deckensysteme (1) bis (6) für Szenario H+E+W - Weiter- und Wiederverwendung (Modul D)

4. Fazit

Im Zuge der Klimakrise kommt der ökologischen Bewertung von Bauwerken eine große Bedeutung zu. Mit zunehmender Energieeffizienz von Gebäuden steigt dabei die Relevanz der konstruktionsbedingten Treibhausgasemissionen, die über die Wahl des jeweiligen Deckensystems maßgeblich beeinflusst werden können. Ein prinzipiell geeignetes Verfahren zur Ermittlung des Treibhauspotenzials und weiterer Umweltwirkungen von Bauwerken, Bauteilen und Prozessen stellt die Ökobilanz dar. Im Zuge der eigenen Untersuchungen wurde allerdings deutlich, dass die Ergebnisse einer Ökobilanz entscheidend von den gewählten Rahmenbedingungen beeinflusst werden können. Prinzipiell besteht das Ziel der Ökobilanz darin, den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu erfassen und darauf aufbauend zu bewerten. Jedoch entstehen hierbei einerseits Unsicherheiten aus der zeitlichen Diskrepanz zwischen dem Bilanzierungszeitpunkt und dem tatsächlichen Auftreten der jeweiligen Emissionen, andererseits aus Informationen, die je nach Planungsstand noch nicht vorhergesagt werden können, z. B.

Zulieferer/Hersteller und Transportwege. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der betrachteten Lebenszyklusphasen sowie der gewählten Datengrundlage in diesem Beitrag eingehend analysiert.

Hieraus geht hervor, dass die Treibhausgasemissionen zwischen Szenario H (Herstellungsphase) und Szenario H+E (Herstellungs- und Entsorgungsphase) insbesondere dann voneinander abweichen, wenn die untersuchten Deckenquerschnitte ganz oder in Teilen aus Holz bestehen und der im Holz gespeicherte, biogene Kohlenstoff bei der Auswertung berücksichtigt wird. Werden ausschließlich die fossilen Emissionen der Deckensysteme (ohne biogenen Kohlenstoff) betrachtet, so resultiert der überwiegende Anteil der Treibhausgasemissionen direkt aus der Herstellungsphase. Demgegenüber kann die Berücksichtigung von Vorteilen außerhalb des Lebenszyklus (Modul D) nennenswerten Einfluss auf die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen haben, insbesondere wenn hierbei eine energetische Verwertung von Holz unter Ansatz aktueller Datensätze berücksichtigt wird. Damit verbundene Fehlanreize wurden thematisiert.

Aus diesem Grund scheint in den Augen der Verfasser eine Bilanzierung der Herstellungsphase für die Bewertung der Treibhausgasemissionen von Deckensystemen je nach projektbezogenem Informationsstand zielführend. Die während dieser Phase anfallenden Umweltwirkungen sind mit einer hohen Zuverlässigkeit vorhersehbar und haben direkten Einfluss auf die Erreichung der Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Mögliche Vorteile aus der Entsorgungsphase oder dem Recycling ergeben sich für Neubauten mit einer planmäßigen Lebensdauer von 50 Jahren erst deutlich später. Der im Holz gespeicherte biogene Kohlenstoff sollte bei dieser Betrachtung getrennt ausgewiesen werden und nicht in die Berechnung des GWPs einfließen, um die unmittelbar anfallenden Emissionen der Deckensysteme vergleichen zu können.

Die gewählte Datengrundlage hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Bilanzierungsergebnisse. Allein innerhalb der ÖKOBAUDAT existieren teils mehrere Datensätze für einen Baustoff, deren Inhalte nennenswerte Abweichungen aufweisen können. Oftmals unterscheiden sich dabei die zugrunde gelegten Randbedingungen wie die Umweltwirkungen der Herstellprozesse oder aber die Materialzusammensetzungen, so z. B. der Klinkeranteil im Beton oder der Anteil an Roheisen bei der Stahlherstellung. Als Grundlage für eine aussagekräftige Bilanzierung gilt es, diese Randbedingungen mit voranschreitendem Planungsstand eines Bauvorhabens möglichst zutreffend zu erfassen. Dies ist insbesondere unter der Voraussetzung einer flächendeckenden Verfügbarkeit herstellerepezifischer EPDs möglich. Sie lassen Rückschlüsse auf die tatsächlichen Emissionen des beauftragten Unternehmens zu und bieten somit eine gesicherte Datenbasis für die Bewertung eines spezifischen Bauvorhabens. Jedoch stehen EPDs aktuell nur vereinzelt zur Verfügung.

Anhand eines abschließenden Vergleiches mehrerer praxisanwendbarer Rohbaudeckensysteme wurden die Potenziale der Konstruktionen zur Reduktion der verursachten Treibhausgasemissionen bewertet. Aus der Gegenüberstellung geht hervor, dass die Stahlbetonmassivdecke, als das am weitesten verbreitete Deckensystem in Deutschland, die größte Menge an Treibhausgasemissionen verursacht. Durch Hohlräume, Rippen und Vorspannung oder die Substitution von Beton und Stahl durch Holz können die Emissionen signifikant reduziert werden. Für das Szenario H+E liegen die Treibhausgasemissionen der HBV-Decke auf dem Niveau der ressourcenverbesserten Betondeckensysteme, wie Hohlkörper- und Rippendecke sowie der Spannbetonhohldiele. Erst unter Berücksichtigung von Modul D und damit möglicher Vorteile aus der energetischen Verwertung des Holzes am Ende seines Lebenszyklus ergeben sich signifikante Vorteile für die HBV-Decke. Die Brettsperrholzdecke stellt in jedem Vergleich das Deckensystem mit dem geringsten GWP dar. Zudem eignet sich ihr massiver Holzquerschnitt gut für eine Kaskadennutzung, ist vor dem Hintergrund einer begrenzten Holzverfügbarkeit [47] allerdings auch kritisch zu hinterfragen.

Mögliche Auswirkungen der Deckensysteme auf weitere Gebäudebestandteile werden in diesem Beitrag nicht thematisiert, sollten bei der Planung eines Gebäudes allerdings berücksichtigt werden. Bspw. wirken sich Decken mit einem geringeren Eigengewicht positiv auf die Dimensionierung der lastabtragenden Bauteile sowie der Gründung und damit auf deren GWP und Ressourcenbedarf aus. Dahingegen haben hohe Deckenquerschnitte eine Vergrößerung der Gebäudehöhe und damit der Fassadenfläche oder aber eine Reduktion der verfügbaren Raumhöhe zur Folge. Auch die Variation der Spannweite und statischen Systeme hat Einfluss auf das GWP der Deckensysteme selbst sowie auf die lastabtragenden Bauteile [48].

Neben der Bewertung der Treibhausgasemissionen sollten beim Gebäudeentwurf stets auch Kreislaufwirtschaftspotenziale und damit Kriterien wie z. B. die Rückbaubarkeit und Trennbarkeit der Bauteile und Materialien berücksichtigt werden. Da damit verbundene GWP-Gutschriften zum aktuellen Zeitpunkt nur mit großer Unsicherheit abschätzbar sind, können hierfür alternative Bewertungsmechanismen wie z. B. der Urban Mining Index [49] herangezogen werden.

Die Gegenüberstellung zeigt am Beispiel unterschiedlicher Deckensysteme, dass bereits Lösungen für ein ressourcen- und treibhausgas-effizienteres Bauen existieren, es bisher allerdings an geeigneten Anreizsystemen mangelt, die die ökologischen Gesichtspunkte gegenüber baupraktischen und wirtschaftlichen Vorteilen weiter in den Vordergrund rücken [7]. Ein wirksames Anreizsystem für ein ressourcen- und treibhausgas-ärmeres Bauen mit Beton könnten verbindliche Grenzwerte auf Bauteilebene sein, die analog der Sektorziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes zunehmend verschärft werden. Auf diese Weise könnte die vorhandene Innovationskraft aller am Bau Beteiligten bereits auf niedriger Ebene hin zu einem ökologischeren Bauen gelenkt werden. Der Technische Ausschuss „Nachhaltig Bauen mit Beton“ des DAfStb nimmt sich dieser Fragestellung bereits an und prüft geeignete Wege zur Umsetzung.

Referenzen

1. Europäische Kommission (2019) Der europäische Grüne Deal – Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.
2. Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetz – KSG. (idF v. 18.08.2021) in: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021, Teil I, Nr. 59, S. 3905–3907.
3. Europäische Union (2020) VERORDNUNG (EU) 2020/852 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 – EU-Taxonomie in: Amtsblatt der Europäischen Union, S. 13–43.
4. United Nations Environment Programme (2020) 2020 Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.
5. Lord, M. (2017) Zero Carbon Industry Plan – Rethinking Cement.
6. Glock, C.; Heckmann, M.; Hondl, T.; Kaufmann, F.; Schellen, M.; Sefrin, R. (2022) Massivbau in Zeiten von Klimawandel und Ressourcenverknappung – Herausforderungen und Lösungsansätze in: Bauingenieur 97, 01-02, S. 1–12.
7. Glock, C.; Dernbach, A.; Heckmann, M.; Hondl, T.; Kaufmann, F.; Schellen, M. (in Vorbereitung) Treibhausgas- und ressourcenreduzierter (Beton)Bau - Herausforderungen,

- Lösungsansätze, Anreizsysteme in: DBV-Heft 50, Band 1 - Nachhaltiges Bauen mit Beton.
8. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2021) Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion – Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden.
 9. Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R.; Sobek, W. (2021) Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien in: Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969–977.
 10. Furche, J.; Bauermeister, U. (2008) Elementbauweise mit Gitterträgern in: Beton-Kalender 2009. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 337–498.
 11. E DIN EN 15978-1:2021-09 (2021) Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität; Deutsche und Englische Fassung prEN 15978-1:2021. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
 12. DIN EN 15643:2021-12 (2021) Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken; Deutsche Fassung EN 15643:2021. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
 13. DIN EN 15804:2022-03 (2022) Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
 14. DIN EN ISO 14040:2021-02 (2021) Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
 - [15] DIN EN ISO 14044:2021-02 (2021) Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
 16. EPEA GmbH Cradle to Cradle. <https://epea.com/ueber-uns/cradle-to-cradle> [Zugriff am: 23. Aug. 2022].
 17. Hillebrandt, A.; Riegler-Floors, P.; Rosen, A.; Seggewies, J.-K. (2018) Atlas Recycling – Gebäude als Materialressource. München: Detail Business Information GmbH.
 18. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015) Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude – Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen.
 19. BREEAM UK (2018) BREEAM UK New Construction – Non-domestic Buildings (All UK), Technical Manual SD5078: BREEAM New Construction 2018 3.0.
 20. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2018) DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau. 3. Aufl.
 21. U.S. Green Building Council (2022) LEED v4.1 Building Design and Construction – Getting started guide for beta participants.
 22. Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2021) ÖKOBAU-DAT – Informationsportal nachhaltiges Bauen. <https://www.oekobaudat.de/> [Zugriff am: 20. Sep. 2022].

23. Figl, H.; Kusche, O. (2021) ÖKOBAUDAT-Handbuch – Technisch/formale Informationen und Regeln zur ÖKOBAUDAT-Datenbank. 2. Aufl.
24. ecoinvent. <https://ecoinvent.org/> [Zugriff am: 20. Sep. 2022].
25. circular ecology Embodied Carbon - The ICE Database. <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html> [Zugriff am: 20. Sep. 2022].
26. Wagner, B.; Heckmann, M.; Pfnür, A.; Glock, C. (2022) Erfolgspotenziale der Holz-hybridbauweise in der Immobilienprojektentwicklung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
27. ÖKOBAUDAT Brettschichtholz - Standardformen (Durchschnitt DE). https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a432f3fd-de60-4a11-9acb-b9a21731bacf&version=00.00.022&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
28. DIN 4109-1:2018-01 (2018) Schallschutz im Hochbau – Teil 1: Mindestanforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
29. ÖKOBAUDAT Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=71667cf3-ede8-42d2-b0ff-6f1071ad3b86&version=00.04.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
30. ÖKOBAUDAT Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b6096c9c-1248-4ce1-9c2d-f4a48aade80f&version=00.03.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 2. Jul. 2022].
31. ÖKOBAUDAT Transportbeton C30/37. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a758fb6a-7fb1-4cdc-b652-c42cf2f7632c&version=20.20.020&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
32. ÖKOBAUDAT Beton der Druckfestigkeitsklasse C 50/60. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=2b2d1f3f-ab92-449d-8a2e-cd7e85818406&version=00.03.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
33. ÖKOBAUDAT Bewehrungsstahl. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
34. ÖKOBAUDAT Baustähle: Offene Walzprofile und Grobbleche (de). https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5cb2c568-76fe-4803-8b46-0084e79800c8&version=00.14.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 24. Aug. 2022].
35. ÖKOBAUDAT binderholz Brettschichtholz BSH. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d3dbba95-2921-4fa5-9b20-32f37c6c0793&version=00.04.000&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].

36. ÖKOBAUDAT Brettsperrholz (Durchschnitt DE).
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=7f12b868-0c13-4a5d-bfe7-0f05734cca89&version=00.00.021&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
37. ÖKOBAUDAT Stahl Feinblech (0,3-3,0mm).
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=9cbdbafe-8377-46ca-a640-8e3c8fc518c0&version=20.19.120&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
38. Institut Bauen und Umwelt e.V. (2018) Umwelt-Produktdeklaration Cobiax Hohlkörpermodule Heinze Cobiax Deutschland GmbH; EPD COB-20180135-IAD1-DE. Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V.
39. ÖKOBAUDAT Transportbeton C20/25.
https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=9702d9ab-2af2-4fdc-9d99-225583a9ffb7&version=20.20.020&stock=OBD_2021_II&lang=de [Zugriff am: 7. Feb. 2022].
40. Ferrometall AS (2015) Environmental Product Declaration – Prestressed steel for reinforcement of concrete, PC Strand.
41. Hjulbro Steel AB (2020) Environmental Product Declaration – PC-Strand - Pre-stressed steel for reinforcement of concrete.
42. OneSteel NSW Pty Ltd (2016) Environmental Product Declaration – Reinforcing rod, bar, and wire.
43. D&D Wire Industrial and Trading Co. Ltd. (2020) Environmental Product Declaration – Stabilized wires and strands for prestressing of concretes.
44. BNP Paribas Real Estate GmbH (2022) Investmentmarkt Green Buildings – Market Focus 2022. <https://www.realestate.bnpparibas.de/marktberichte/investmentmarkt/deutschland-market-focus> [Zugriff am: 25. Aug. 2022].
45. Royal Institute of Chartered Surveyors (2017) Whole life carbon assessment for the built environment. RICS professional standards and guidance.
46. Gibbons, O. et al. (2022) How to calculate embodied carbon. London: The Institution of Structural Engineers
47. Beck-O'Brien, M. et al. (2022) Alles aus Holz – Rohstoff der Zukunft oder kommende Krise; Ansätze zu einer ausgewogenen Bioökonomie. WWF Deutschland.
48. Warter, L.; Kromoser, B. (2022) Ökologische Effizienz von Hochbaudecken – Aktuelle Systeme und Zukunftspotenzial in: Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 1, S. 3-14.
<https://doi.org/10.1002/best.202200076>
49. Rosen, A. (2021) Urban Mining Index – Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.



Albert
**Schneider – Bau-
tabellen für Ingenieure**
mit Berechnungshinweisen
und Beispielen

26., aktualisierte Auflage, 2024,
ca. 1900 Seiten, 14,8 x 21,0 cm,
Buch (Hardcover), 56,00 €
ISBN 978-3-8462-1479-4

| Print | Digital |



Albert
**Schneider – Bautabellen
für Architekten**
Entwurf – Planung –
Ausführung

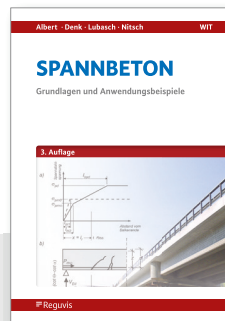
26., überarbeitete Auflage, 2024,
ca. 1392 Seiten, 14,8 x 21,0 cm,
Buch (Hardcover), 49,00 €
ISBN 978-3-8462-1527-2

| Print | Digital |



Konstruktiver Ingenieurbau
Zeitschrift für den Konstruktiven
Ingenieurbau

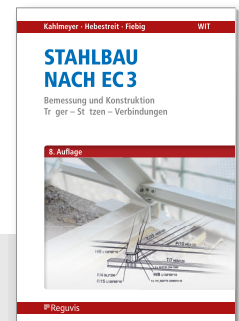
Printausgabe + Online Archiv,
ca. 60 Seiten je Heft, A4 Format,
jährlich Abonnement 199,00 €
Erscheinungshinweis: 6 x jährl.,
ungerade Monate
ISSN 2509-2847



Albert · Denk · Lubasch · Nitsch
Spannbeton
Grundlagen und Anwendungsbeispiele

3., aktualisierte Auflage, 2024, ca. 240 Seiten,
17,0 x 24,0 cm, Buch (Softcover), 39,00 €
ISBN 978-3-8462-1441-1

| Print |



Kahlmeyer · Hebestreit · Fiebig
Stahlbau nach EC 3
Bemessung und Konstruktion – Träger –
Stützen – Verbindungen

8., aktualisierte und erweiterte, 2024, ca. 352
Seiten, 16,5 x 24,4 cm, Buch (Softcover), 42,00 €
ISBN 978-3-8462-1442-8

| Print |



Avak · Busch · Neff
Stahlbetonbau in Beispielen – Teil 1
Grundlagen der Stahlbeton-Bemessung –
Bemessung von Stabtragwerken nach EC 2

8., aktualisierte Auflage, 2023, ca. 428 Seiten,
17,0 x 24,0 cm, Buch (Softcover), 42,00 €
ISBN 978-3-8462-1317-9

| Print |

Bundle (Teil 1 und Teil 2), 76,00 €
ISBN 978-3-8462-1319-3

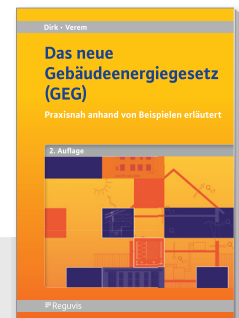


Avak · Busch · Neff
Stahlbetonbau in Beispielen – Teil 2
Bemessung von Flächentragwerken nach EC 2
– Konstruktionspläne für Stahlbetonbauteile

6., aktualisierte Auflage, 2023, ca. 435 Seiten,
17,0 x 24,0 cm, Buch (Softcover), 42,00 €
ISBN 978-3-8462-1318-6

| Print |

Bundle (Teil 1 und Teil 2), 76,00 €
ISBN 978-3-8462-1319-3



Dirk · Verem
Das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG)
Praxisnah anhand von Beispielen erläutert

2., aktualisierte Auflage, 2024, ca. 300 Seiten,
17,0 x 24,0 cm, Buch (Softcover), 42,00 €
ISBN 978-3-8462-1446-6

| Print | E-Book |



Notizen

A series of horizontal dashed lines for writing notes.

Notizen

A series of horizontal dashed lines for writing notes.

Aussteller

Wilhelm Ernst & Sohn

Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
Stefanie Oeckel
Rotherstraße 21
10245 Berlin
E stoeckel@wiley.com
www.ernst-und-sohn.de



Reguvis Fachmedien GmbH

Bettina Kronier
Amsterdamer Str. 192
50735 Köln
E bettina.kronier@reguvis.de
www.reguvis.de



SOFISTIK AG

Frank Weber
Flataustraße 14
90411 Nürnberg
E frank.weber@sofistik.de
www.sofistik.com/de



Trimble Solutions Germany GmbH

Stefanie Krug
Am Prime-Parc 11
65479 Raunheim
E stefanie_krug@trimble.com
www.tekla.com/de/kontakt



Pollmeier Massivholz GmbH & Co. KG

Doris Tegelkamp
Pferdsdorfer Weg 6
D-99831 Creuzburg
E doris.tegelkamp@pollmeier.com
www.pollmeier.com



RC-Baustoffe Berlin GmbH & Co. KG

Thomas Drechsler
Bitterfelder Straße 23 A
D-12681 Berlin
E t.drechsler@heim-gruppe.de
<http://www.heim-gruppe.de>



Peikko Deutschland GmbH

Andrej Guthmann
Brinker Weg 15
34513 Waldeck
E andrej.guthmann@peikko.com
peikko@peikko.de



UNIDOME GERMANY GMBH

Dr. Karsten Pfeffer
Große Hub 10a
65344 Eltville am Rhein
E office@unidome.de
www.unidome.de



Xella Deutschland GmbH

Jacob Kowol
Vertrieb Multipor
Düsseldorfer Landstrasse 395
47259 Duisburg
E jacob.kowol@xella.com
www.xella.de/de_DE/systeme/daemmung



FRANZISKA HAIN

Franziska Hain
Fasanenstraße 16
38667 Bad Harzburg
E kontakt@franziska-hain.de
www.franziska-hain.de/



Wayss & Freytag Ingenieurbau AG

Sven Tesanovic
Eschborner Landstraße 130-132
60489 Frankfurt
E info@wf-ib.de
www.wf-ib.de



Structurae

Nicolas Janberg
Dresdener Str. 110
10179 Berlin
E info@nicolas-janberg.de
<https://structurae.net/de>



