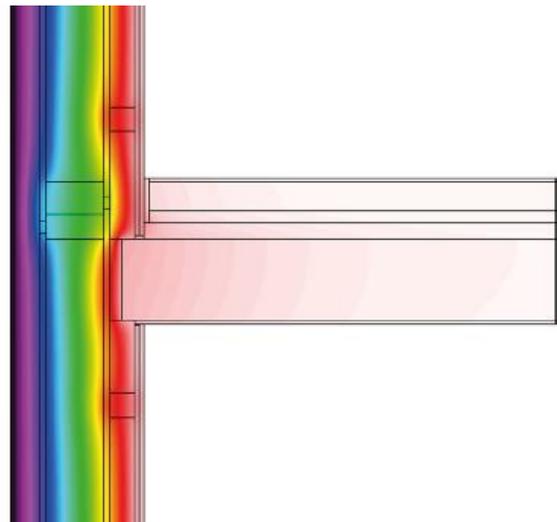
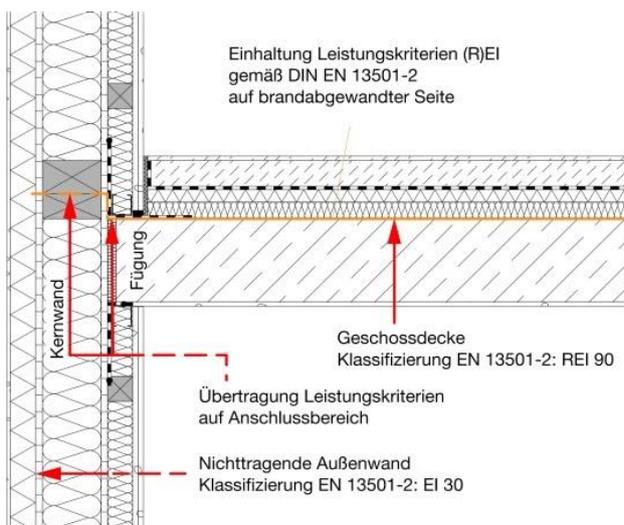
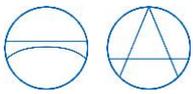




FASSADENELEMENTE FÜR HYBRIDBAUWEISEN

Vorgefertigte, integrale Fassadenelemente in Holzbauweise zur Anwendung im Neubau hybrider Stahlbetonhochbauwerke





Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Fassadenelemente für Hybridbauweisen -
Vorgefertigte, integrale Fassadenelemente in Holzbauweise zur Anwendung im Neubau
hybrider Stahlbetonhochbauwerke

Forschungsstelle:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion - Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen - Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
Lehrstuhl für Massivbau - Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer
Arcisstraße 21
80333 München

Projektleitung:

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Dr.-Ing. René Stein

Projektbearbeitung:

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Dipl.-Ing. Miriam Kleinhenz
Dr.-Ing. René Stein
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen
Dipl.-Ing. (FH) Christina Dotzler, M. Eng.
Dipl.-Ing. Patricia Schneider, Architektin
Lehrstuhl für Massivbau
Dipl.-Ing. Christof Volz

Studentische Hilfskräfte
Christoph Werner
Pierre Keller-Psathopoulos, M.Sc.
Jochen Mecus, B.Sc.

Projektmitarbeit:

ift Rosenheim Abteilung Bauakustik
Dr. rer. nat. Joachim Hessinger

Laufzeit:

Februar 2014 bis September 2016

Gefördert aus Mitteln der:

Bayerischen Bauwirtschaft
Lessingstraße 4
80336 München



Vorwort

Der iterative Prozess des Entwerfens und Konstruierens muss immer in einem gemeinsamen Kontext betrachtet werden, da qualitativ hochwertige Bauwerke nur aus der Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Architekten sowie weiteren Fachleuten resultieren. Zur Verfolgung des integralen Konzeptes wurde eine heterogene Zusammensetzung der beteiligten TUM-Lehrstühle sowie des Labors Bauakustik ift Rosenheim und der projektbegleitenden Arbeitsgruppe mit Vertretern von Massiv- und Holzbauunternehmen vorgenommen.

Im projektbegleitenden Ausschuss beratend mitgewirkt haben die folgenden Personen:

- Dipl.-Ing Alexander Gumpp - GUMPP & MAIER GmbH, Binswangen
- Dipl.-Ing. Holztechnik (FH) Rupert Kurde, Dipl.-Ing. (FH) Holzbau und Ausbau Martin Nachtwey - HUBER & SOHN GmbH & Co. KG, Bachmehring
- Dipl. -Ing. (FH) Simon Schmid M.Eng. - MERK TIMBER GmbH (Züblin), Aichach
- Dipl.-Ing. Olaf Breuer, KRÄMMEL GmbH & Co. Verwaltungs KG , Wolfratshausen
- Dipl.-Ing. Michael Panhans - KETONIA Spannbeton-Fertigteilewerk GmbH , Weiden
- Dipl.-Ing. Andreas Link - GEIGER GmbH & Co. KG Unternehmensgruppe Schlüsselfertigbau, Augsburg
- Dipl.- Ing. (FH) Werner Goller MBA & Eng. – BAYERISCHER BAUINDUSTRIEVERBAND, München

Insbesondere hat der projektbegleitende Ausschuss durch die Teilnahme an den Arbeitsgruppensitzungen sowie eines Planungsworkshops wesentlich bei der Konzipierung integraler und praxistauglicher Konstruktionsdetails und damit zum erfolgreichen Gelingen des Projektes beigetragen.

Für die Koordination und Betreuung bei der Durchführung der Schallversuche möchten wir uns bei den Herren Dipl.-Ing. (FH) Andreas Preuss und Dipl.-Ing. (FH) Stefan Bacher der Schallprüfstelle Bauakustik des ift Rosenheim bedanken. Ein besonderer Dank geht an den Prüfstellenleiter Herrn Dr. rer. nat. Joachim Hessinger, der durch seine fachlich fundierten Anmerkungen bei den Schallversuchen und die schallschutztechnischen Beiträge im Abschlussbericht und Konstruktionskatalog wesentlich zum Gelingen des Projektes beigetragen hat.

Für die Unterstützung bei der Planung und Herstellung sowie praxisgerechten Montage und Befestigung der Schallprüfkörper möchten wir uns bei den Herren Franz Stoiber (Hochbautechniker/Zimmerermeister) und Alois Beham (Zimmerer), HUBER & SOHN GmbH bedanken.

Wir bedanken uns recht herzlich für den fachlichen Austausch und die konstruktive Unterstützung der jeweiligen Planungsbüros aller Referenzprojekte. Besonderer Dank gilt dabei den Planungsbüros Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH (Schwarzach - AT), bauart Konstruktions GmbH & Co. KG (Lauterbach), faktor10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH (Darmstadt), bof Architekten (Hamburg), Deimel Oelschläger Architekten Partnerschaft (Berlin) und Trapez Architektur (Hamburg), deren Projekte als Grundlage für die Parameterstudien dienten.

Abschließend möchten wir uns für die Mittelbereitstellung durch die Bayerische Bauwirtschaft bedanken.

Kurzfassung

Die Zielsetzung des Vorhabens war die Weiterentwicklung vorgefertigter Holzfassadenelemente zur Herstellung einer hochgedämmten, energie- und ressourceneffizienten Gebäudehülle unter überwiegender Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Verbindung mit Stahlbetontragwerken. Dabei stand die konsequente Verknüpfung der beiden in den genannten Gebieten hervorragend entwickelten Bauweisen im Vordergrund. In Kombination mit dem Rohbau wurden Fragestellungen in den Bereichen Tragwerksplanung, Wärme- und Feuchteschutz sowie Brand- und Schallschutz unter dem Gesichtspunkt behandelt, wirtschaftlich optimierte Anschlüsse zwischen Stahlbetondecken und -wänden mit vor- oder eingestellten Holzbauelementen zu generieren. Eine möglichst hochwertige und vollständig mangelfreie Bauausführung ist zudem die Grundlage nachhaltigen Bauens. Um dabei die Klimaschutzziele zu erreichen, ist die Energie- und Ressourceneffizienz der Neubauten bei der Herstellung und im Betrieb zu erhöhen, wozu wesentlich die Optimierung der verwendeten Bauteile gehört. Die Angabe und Ermittlung entsprechende Kennwerte, u.a. aus den Lebenszyklusanalysen (LCA) und Recyclingkonzepten der verwendeten Bauteile bildet einen weiteren integralen Planungsaspekt, der in Zukunft im Rahmen von Vergabeentscheidungen und von Zertifizierungssystemen zunehmend Bedeutung erlangen wird. Zusammenfassend sollen die Ergebnisse in einem standardisierten Konstruktionskatalog eingearbeitet werden, der Anwendungsmöglichkeiten und Kombinationen der Holzfassadenelemente bis zur Hochhausgrenze beinhaltet.

Während durch den Skelett- und Schottenbau in Stahlbetonbauweise sehr effiziente und gut bewährte Rohbaulösungen im mehrgeschossigen Bauen geboten werden, können mit vorgefertigten Holzfassadenelementen qualitativ hochwertige Außenwände hergestellt werden. Dennoch kommen in Deutschland vorgefertigte Holzfassadenelemente in neuen Stahlbeton-, Stahl- oder Mischbauweisen praktisch nicht zum Einsatz. Vor dem Hintergrund des deutlich gewachsenen Industrialisierungsgrades der Holzbaubetriebe bietet sich für die Zukunft eine intensivere Zusammenarbeit zwischen klassischer Bauindustrie und den Holzbauunternehmen an. Für vorgefertigte Fassadenelemente bestehen besondere Anwendungsmöglichkeiten: Sie erlauben, hochgedämmte Elemente einschließlich Verglasungen und bereits applizierter Fassade auf die Baustelle zu liefern und somit die Gesamterrichtungszeit der Gebäude erheblich zu verringern. Pilotprojekte haben gezeigt, dass die Kombination der Bauweisen großes Potential für die weitere Industrialisierung und Beschleunigung von Bauprozessen hat, bei gleichzeitiger Erhöhung der Qualitätsstandards und Verbesserung der Arbeitsbedingungen. Es wurde aber auch deutlich, dass es Wissenslücken in den Bereichen Verformungsverträglichkeit, Schall- und Brandschutz gibt und es an einer abgestimmten, durchgängigen Detaillierung fehlt.

Der Begriff „Hybridbauweise“ wird in dem Projekt für die Kombination der Holz- und Stahlbetonbauweise auf der Ebene des Gesamtgebäudes verwendet. Die funktionale Abgrenzung des Tragwerks von der nichttragenden Gebäudehülle ist ein wesentlicher Aspekt für die Hybridbauweise, der einen Anwendungsbereich der vorgefertigten Fassadenelemente in Holzbauweise, ohne Abweichung von den derzeit gültigen bauordnungsrechtlichen Vorgaben, bis zur Hochhausgrenze (Höhe oberster Geschossfußboden gegenüber mittlerer Geländehöhe ≤ 22 m) ermöglicht. Der Anwendungsbereich ergibt sich aus der Muster-Bauordnung (MBO, 2002) bzw. den darauf aufbauenden Landesbauordnungen (LBO's).

Die Fassadenelemente können als vorgestellte, vorgehängte oder eingestellte Variante ausgeführt werden, wobei in Abstimmung mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe die erste und letzte Variante weiter verfolgt wurde. Aus statischer Sicht können die vorgestellten Holzfassadenbauelemente ebenfalls als selbsttragendes Bauteil ausgebildet und die Lasten (Eigenlasten und Windlasten) in ein eigenes Fundament wei-

tergeleitet werden. Es handelt sich dann im Sinne der Bauordnung bei dieser Variante um eine nichttragende Fassade, wenn sichergestellt wird, dass im Brandfall durch entsprechend ausgelegte Verbindungen kein Versagen der oberhalb des Brandgeschosses befindlichen Elemente auftritt.

In Abhängigkeit von den Projektzielen wurden in einem ersten Schritt tragwerkstechnische und bauphysikalische Randbedingungen sowie aktuelle Entwicklungen für die Herstellung energieeffizienter und ressourcenschonender Gebäude (Kapitel 2) als auch fertigungsspezifische und montagetechnische Aspekte (Kapitel 3) für die zuvor beschriebene Hybridbauweise ermittelt. Wichtige Informationen zur baupraktischen Konzipierung von Details lieferte die Sammlung und Auswertung von 13 Projektbeispielen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, die von 2008 bis 2015 in Hybridbauweise errichtet wurden (Kapitel 4). Aus der Grundlagenermittlung (Kapitel 2 bis 4) sowie einem Planungsworkshop mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe wurden praxisorientierte Bauteil- und Anschlussvarianten entwickelt. Die darauf aufbauenden Parameterstudien und Laborversuche (Kapitel 5) gliedern sich in die Bereiche Tragwerke und Verbindungen (Kapitel 5.1), Verformungsverhalten von Stahlbetontragwerken im Zustand II (Kapitel 5.2), geometrische und materialspezifische Wärmebrücken (Kapitel 5.3), Untersuchungen zur Flankenschalldämmung (Kapitel 5.4.) und Brandweiterleitung (Kapitel 5.5) in Anschlussbereichen sowie Lebenszyklusanalysen der verwendeten Bauteile (Kapitel 5.6).

Aus den Parameterstudien und Laborversuchen wurden Konstruktionsregeln für Bauteile und Anschlüsse der Hybridbauweise ermittelt. Diese wurden innerhalb eines iterativen Entwurfsprozesses unter Berücksichtigung fertigungs- und montagetechnischer Anforderungen erarbeitet. Die Konstruktionsregeln wurden teilweise allgemein festgehalten und teilweise spezifisch für Dachanschlüsse, Geschossdeckenstöße und Sockelanschlüsse unterschiedlicher Art entwickelt. Zusammenfassend dargestellt sind die Ergebnisse in dem geforderten Konstruktionskatalog, der eine Hilfestellung für die Planung und Ausführung bietet und bisher vorhandene Wissenslücken schließt. Ergänzend zum Katalog kann der Abschlussbericht herangezogen werden, welcher Hintergrundinformationen sowie ein Verständnis zur Einschätzung der statischen, bauphysikalischen und ökologischen Faktoren gibt. Dem Leser und Anwender der beiden vorgenannten Publikationen eröffnet sich die Möglichkeit ein optimiertes Gebäude in Hybridbauweise bis zur Hochhausgrenze zu planen und auszuführen.

Insgesamt konnte mithilfe des Forschungsvorhabens aufgezeigt werden, dass diese Art der Hybridbauweise - Kombination vorgefertigter nichttragender Holzfassadenelemente mit einem Stahlbetontragwerk - eine qualitativ hochwertige und energieeffiziente Lösung darstellt. In den Arbeitsgruppensitzungen, in einem Workshop Anfang des Jahres 2015 sowie bei der Abschlussveranstaltung im Juni 2016 war deutlich zu vermerken, dass Thema und Ergebnisse sowohl bei Massivbau- als auch Holzbauunternehmen von großem Interesse sind.

Als Vorteile dieser Hybridbauweise wurde die Optimierung des Werkstoffeinsatzes sowie die Beschleunigung von Bauabläufen identifiziert. Der Holzbau erhält eine weitere Einsatzmöglichkeit seiner Holzbausysteme. Der Massivbau erhält die Möglichkeit durch den verstärkten Einsatz des nachwachsenden Baustoffes Holz Lebenszyklusanalysen und Recyclingkonzepte zu optimieren. Beide Gewerke können unabhängig voneinander ihre Fertigungs- sowie Montageprozesse organisieren und durchführen.

Nach Erstellung des Stahlbetontragwerks werden die Holzfassadenelemente befestigt. Wichtig in diesem Zusammenhang bleibt die Diskussion der Schnittstelle inklusive aller tragwerkstechnischen und bauphysikalischen Aspekte.

Auf dem Weg zu einem ökologischen Bauwesen können Hybridkonstruktionen in zweierlei Hinsicht einen entscheidenden Beitrag leisten: Zum einen bieten sie die Möglichkeit der Verwendung nachwachsender

Rohstoffe in Gebäuden, die derzeit vornehmlich aus mineralischen Baustoffen errichtet werden. Zum anderen ermöglicht die Montage von leichten Fassadenelementen an Stahlbetonbauwerken eine einfache Demontierbarkeit der Fassade, wenn sie nicht mehr dem technischen oder ästhetischen Standard entspricht. Dadurch erhöht eine Fassade in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise die Flexibilität und Umbaubarkeit eines Gebäudes, so dass auch der im Tragwerk verbaute Stahlbeton einer längeren Nutzung zugeführt werden kann, bevor ein Downcycling stattfindet.

Interessant bleiben die Auswirkungen des erarbeiteten Konstruktionskataloges auf die Planungsprozesse realer Projekte. Erste Erkenntnisse wurden in einem parallel angestoßenen Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Städtischer Hartplatz, Penzberg“ gesammelt, das in Kooperation der TU München mit der Krämmel Wohn- und Gewerbebau GmbH, Wolfratshausen durchgeführt wurde. Bei dem Bauvorhaben wird die hybride der massiven Bauweise direkt gegenübergestellt, indem zwei von fünf Mehrfamilienhäusern mit nichttragenden Außenwänden in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise ausgeführt werden. Somit konnten neben der Erarbeitung des Energieversorgungskonzeptes die Vor- und Nachteile im Bereich der Ökobilanz und Bauphysik dokumentiert und ausgewertet werden. Für die Überführung von erarbeiteten Konstruktionsgrundlagen in die Praxis ist dieses Pilotprojekt von großer Bedeutung. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Probleme im Planungs- und Bauprozess identifiziert und praxistaugliche Lösungswege gestaltet werden.

Ein Monitoring weiterer Beispielprojekte könnte die gewonnenen Erfahrungen in Bezug auf die Hybridbauweise erweitern sowie eine wertvolle Validierung der Anwendung des Konstruktionskataloges bedeuten und zu einer weiteren Qualitätssteigerung im Bauwesen beitragen. Beispielprojekte könnten darüber hinaus dazu genutzt werden, Schallprüfungen in-situ durchzuführen, um diese mit den Laborversuchsergebnissen zu vergleichen und gegebenenfalls weitere Varianten und baupraktische Einflüsse bestimmen zu können. Ebenso ist die Möglichkeit für die Verwendung von Holzfassadenelementen ohne Installationsebene sowie Holz-Beton-Verbund-Decken noch in das System zu integrieren und die Anschlussvarianten entsprechend zu erweitern.

Abstract

The aim of this project was the further development of prefabricated timber façade elements for a highly insulated as well as energy and resource efficient building skins. Mainly renewable building materials in combination with reinforced concrete structures were to be used. The research focused on the consequent linking of individual well-developed construction methods. Issues of structural planning, insulation and moisture protection, as well as fire and noise protection were covered in order to generate economically optimised connections between the concrete slab or wall and the timber façade elements. Furthermore, building with a high degree of quality and free of defects is the basis of sustainable construction. The energy and resource efficiency of future buildings must be increased during fabrication and use in order to achieve the climate protection goals. A main part of this is the optimisation of building elements. Declaring and determining the characteristic values, for example from life cycle analyses and recycling concepts of the used elements, represent a further integral aspect of planning which will gain importance in future award and certification procedures.

Finally the results were to be summarised in a standardised design catalogue which includes application possibilities and combinations of the timber façade elements up to the high-rise building level.

While skeleton and bulkhead construction represent very efficient and proven methods for constructing shells of multi-story buildings, pre-fabricated timber façade elements can be used to create high quality exterior walls. Still, pre-fabricated timber façade elements are practically never used in new concrete, steel or hybrid construction in Germany. Taking into account the increase in industrialisation of timber construction companies, a higher degree of collaboration between the conventional building industry and timber construction companies is feasible. Special possibilities of application exist for pre-fabricated façade elements: They enable the delivery of highly insulated elements including windows and finishing to the construction site which reduces the building erection time. Pilot projects have shown, that combining building methods has a high potential for the further industrialisation and acceleration of building processes while raising quality standards and improving working conditions at the same time. However, it was also shown, that gaps in knowledge exist on the topics of deformation tolerance, noise and fire protection as well as consistent detailing.

For this project the term “hybrid construction method” is used for the combination of timber and reinforced concrete construction on the basis of the whole building. The functional distinction between the load bearing structure and the non-load bearing building envelope is a substantial aspect for the hybrid construction method which enables the use of pre-fabricated timber façade elements up to the high-rise building level (height of top level floor above mean terrain level ≤ 22 m) without conflicting with current German building codes.

The facade elements can be placed in front of the structure, be attached to structure as a curtain wall, or placed inside of the structure as a floor-to-floor system. In coordination with the project's accompanying expert group, only the first and last variant is studied further. From a structural perspective, each of the mentioned variants can also be built as a self-supporting structure and the loads passed on to separate foundations. In this case, it must be ensured, that the façade elements that are located above the fire storey do not fall down due to appropriately designed connections.

In a first step, depending on the project goals, boundary conditions were determined concerning the structural design, building physics and current developments in the construction of energy and resource efficient buildings (chapter 2), as well as production and installation specific aspects (chapter 3). Important information for concepts on the actual design of details were obtained by collecting and analysing 13 ex-

ample projects in Germany, Austria and Switzerland which were constructed as hybrid structures between 2008 and 2015 (chapter 4). Practice oriented element and connection details were developed based on the preliminary research (chapters 2 to 4) and the results of a planning workshop with the project's accompanying expert group. The subsequent parameter study and laboratory tests (chapter 5) can be divided into the topics load-bearing structure and connections (chapter 5.1), deformation behaviour of reinforced concrete structures (chapter 5.2), geometric and material specific thermal bridges (chapter 5.3), studies on the noise protection at the flanks (chapter 5.4), fire propagation in connections (chapter 5.5) and life cycle analyses of the used components (chapter 5.6).

Design rules were developed for components and connections of the hybrid construction method based on the parameter studies and laboratory tests. This was done as part of an iterative design process taking production and installation requirements into account. The design rules were developed in part as general rules but also specified for different types of roof connections, ceiling joints and base connections. The design rules were summarised in the design catalogue which aids in the planning and construction process and closes the previously existing gaps in knowledge. Additionally, the project report provides further information as well as an understanding in estimating structural, building physical or ecological factors. The aforementioned publications enable the reader to plan and construct optimised hybrid buildings up to the high-rise level.

In total, the research project showed that this type of hybrid construction – combining pre-fabricated non-load-bearing timber façade elements with a reinforced concrete structure – represents a high quality and energy efficient alternative solution. During expert group meetings, at a workshop in early 2015 and also at the project's closing event in June of 2016, it was clearly noticeable that a high level of interest exists within the concrete and timber construction industry.

The optimization of the material usage as well as the decrease of building time was identified as advantages of the hybrid building method. Timber construction gains a new area of application of its timber construction systems. Concrete construction is able to optimize its life cycle analyses and recycling concepts through an increased use of wood as a renewable material. Both trades can optimise their production and installation processes independently of each other.

Following the construction of the reinforced concrete shell, the timber façade elements can be mounted. The important discussion of connection points and all structural and buildings physical aspects remains.

On the road to an ecological building industry, hybrid constructions contribute to a more sustainable built environment in two important ways: For one, they provide a means to implement renewable materials in building which currently are mainly constructed from mineral based materials. Secondly, the integration of light weight façade elements in concrete shells also facilitates a simple deconstruction of the façade. This increases the flexibility and conversion possibility of buildings which leads to longer usage times for the underlying concrete structure before down cycling takes place.

Of interest are the effects the design catalogue will have on planning processes of actual projects. Preliminary insights could be gained from a concurrent research and development project "Städtischer Hartplatz, Penzberg" at the Technical University of Munich in cooperation with Krämmel Wohn- und Gewerbebau GmbH, Wolfratshausen. The construction project compares the hybrid building and massive construction method. Two of five apartment buildings using timber frame elements as non-load-bearing exterior walls. While the other buildings are built in a conventional, massive construction method, the development of the energy concept and the advantages and disadvantages concerning the life cycle assessment and building physics could be documented and analysed. The project plays an important role in transitioning the devel-

oped design rules into practice and guarantees that problems in the planning and construction processes can be identified, and practical solutions can be found.

Monitoring future case studies could increase the gathered knowledge on hybrid buildings and provide a valuable validation of the design catalogue while further increasing the level of quality in construction. Case study projects could furthermore be used to conduct noise measurements in-situ in order to compare them to laboratory results and possibly measure new variants and influences. Similarly, the possibility of using timber façade elements without an installation plane as well as timber-concrete-composite ceilings must be integrated into the system and the resulting connection variants expanded.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Umsetzung	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Europäisches Harmonisierungskonzept	5
2.2 Tragwerk	6
2.2.1 Grundlagen	6
2.2.2 Bauweisen mit Stahlbeton	6
2.2.3 Bemessungskonzept	8
2.2.4 Bauweisen mit Holz	14
2.2.5 Beton	23
2.3 Grundlagen Bauphysik	31
2.4 Wärmeschutz	33
2.4.1 Allgemeines	33
2.4.2 Winterlicher Wärmeschutz	33
2.4.3 Sommerlicher Wärmeschutz	40
2.5 Feuchteschutz	44
2.5.1 Schutz vor Schimmelbildung an der Bauteiloberfläche	44
2.5.2 Schutz vor Tauwasserausfall im Bauteilinneren	45
2.5.3 Wetter- und Schlagregenschutz	46
2.6 Luftdichtheit	47
2.6.1 Allgemeine Anforderungen	47
2.6.2 Blower-Door-Test	49
2.6.3 Konstruktionsbedingte Leckagen im Hybridbau	50
2.7 Winddichtheit	51
2.8 Brandschutz	52
2.8.1 Anforderungen im Brandfall	52
2.8.2 Feuerwiderstand nach Musterbauordnung	52
2.8.3 Klassifizierungsmöglichkeiten	53
2.8.4 Bemessung mit Rechen- und Tabellenverfahren	55

2.9	Schallschutz	59
2.9.1	Anforderungen und Zielwerte	59
2.9.2	Nachweisverfahren	61
2.9.3	Schallschutz von Hybridbauweisen	65
2.9.4	Berechnungsbeispiel	65
2.10	Holzschutz	70
2.10.1	Grundlage	70
2.10.2	Kernelement.....	72
2.10.3	Fassade	72
2.10.4	Vorbeugende Maßnahmen zum Schutz des Holzes	74
2.10.5	Grundsätzliche bauliche Maßnahmen	75
2.10.6	Besondere bauliche Maßnahmen.....	77
2.10.7	Maßnahmen mit Holzschutzmitteln	79
2.11	Energieeffizienz (erhöhter energetischer Standard) und Nachhaltigkeit.....	81
2.11.1	Normative Entwicklung und jeweilige Anforderungen – Europäische Gebäuderichtlinie 2010/31/EU	82
2.11.2	KfW- Effizienzhaus KfW-55 nach EnEV 2014.....	83
2.11.3	Passivhausstandard	83
2.12	Lebenszyklusanalyse und Recyclingkonzepte	87
2.12.1	Allgemein	87
2.12.2	Rezyklierbarkeit und Demontierbarkeit von Fassadensystemen	104
2.12.3	LZA - Ökobilanz der Fassadensysteme	112
2.12.4	Systemimmanente Vorteile der Holzfassadenelemente.....	113
3	Fertigungs- und montagetechnische Anforderungen	114
3.1	Holz	114
3.1.1	Grundlage	114
3.1.2	Vorfertigung	114
3.1.3	Transport	115
3.1.4	Montageablauf und -methoden.....	120
3.2	(Stahl-)Beton	121
3.2.1	Ortbetonbauweise mit schlaffer Bewehrung	121
3.2.2	Ortbetonflachdecken mit Vorspannung	125
3.2.3	Halbfertigteile mit Ortbetonergänzung	125
3.2.4	Betonfertigteile (Vollfertigteile).....	127
3.2.5	Vorfertigung	127
3.2.6	Transport und Logistik.....	127
3.2.7	Montageablauf und -methoden.....	129
3.3	Schnittstelle.....	129

3.3.1	Fertigungstoleranzen	129
3.3.2	Lastabhängige Verformungen:	130
4	Gebaute Objekte	131
4.1	Beispiele	131
4.1.1	Vorbemerkungen	131
4.1.2	WohnSinn 2 – Darmstadt.....	133
4.1.3	Campo – Frankfurt am Main.....	135
4.1.4	Realschule Buchloe – Buchloe.....	137
4.1.5	LCT One – Dornbirn.....	139
4.1.6	Südpark – Basel	141
4.1.7	7-geschossiges Wohngebäude – Berlin.....	143
4.1.8	7-geschossiges Nullemissionshaus – Berlin	145
4.1.9	Bildungszentrum „Tor zur Welt“ – Hamburg	147
4.1.10	CO ₂ -neutrale Grundschule – Hamburg	149
4.1.11	Holz5 – Bad Aibling	151
4.1.12	Kalkbreite – Zürich.....	153
4.1.13	Aktiv-Stadthaus – Frankfurt a.M.....	155
4.1.14	Ausblick – Woodscrapper.....	157
4.2	Materialisierung und Detaillierung der Referenzprojekte	158
4.2.1	Auswahl der Referenzprojekte.....	158
4.2.2	Bauphysikalische Eigenschaften	158
4.2.3	Materialisierung und Ökobilanz der Fassaden	160
5	Parameterstudien	173
5.1	Tragwerke und Verbindungen.....	173
5.1.1	Simulationsrechnungen Tragwerk.....	173
5.1.2	Schnittstelle	178
5.2	Bauteilversuche zum Verformungsverhalten Stahlbeton-Tragwerk im Zustand II	186
5.2.1	Motivation	186
5.2.2	Versuchskonzeption	186
5.2.3	Versuchsauswertung	187
5.3	Geometrische und materialspezifische Wärmebrücken	193
5.3.1	Grundlagen	193
5.3.2	Ausgangsdetails	194
5.3.3	Variantenuntersuchung.....	203
5.3.4	Variantenauswertung.....	204
5.3.5	Ableitung von Konstruktionsregeln	223
5.4	Schallschutz	224

5.4.1	Versuchsserie Flankenschalldämmung	224
5.4.2	Anforderungen an die Schalldämmung in Gebäudeinneren nach nationaler Norm	224
5.4.3	Analysen zur horizontalen Flankenschalldämmung	226
5.4.4	Analysen zur vertikalen Flankenschalldämmung	229
5.5	Brandschutz	233
5.5.1	Bauteile	233
5.5.2	Anschlüsse	233
5.6	Lebenszyklusanalyse	235
5.6.1	Bauteilbauten und Ergebnisse der Ökobilanz der Beispielprojekte	236
5.6.2	Analyse und Folgerungen	247
6	Zusammenfassung	248
6.1	Projektergebnisse	248
6.1.1	Grundlagen	248
6.1.2	Mechanische Festigkeit und Standsicherheit	248
6.1.3	Energieeinsparung und Wärmeschutz	249
6.1.4	Schallschutz	250
6.1.5	Brandschutz.....	251
6.1.6	Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen.....	251
6.1.7	Konstruktionskatalog.....	253
6.2	Ausblick.....	254
7	Literatur	255
	Materielle Literatur	255
	Immaterielle Quellen	259
	Normen, Verordnungen und Zulassungen	262
	Software.....	269
8	Abkürzungen	270
9	Anhang	271
	Anhang 1: Randbedingungen Parameterstudie Wärmebrücken und Ökobilanz	271
	Anhang 2: Konstruktionskatalog	276

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im Kontext der Klimaerwärmung ist dem nachhaltigen und „zugleich energie- und kohlenstoffeffizienten Einsatz von Rohstoffen und Produkten im Bauwesen eine entscheidende Rolle“ (Wegener, 2010) zuzusprechen. Dies führt zwangsläufig zu einer verstärkten Verwendung des Baustoffes Holz mit seiner immanent positiven Energie- und Kohlenstoffbilanz. In diesem Zusammenhang verfügt Holz über einzigartige Qualitäten sowohl auf seinem Lebensweg vom Wald über die Produktion und Nutzung in Gebäuden als auch über die Option des stofflichen und energetischen Recyclings. Die gesetzlich verankerten Nachhaltigkeitsstrategien (Bundesregierung, 2012), die auf dem Nachhaltigkeitsdreieck aus wirtschaftlichen, sozialen und umweltbezogenen Maßnahmen aufbauen, führen langsam zu einem Umdenken im Bauwesen. Die Betrachtung des Bauwerkes im Hinblick auf Nachhaltigkeitsindikatoren wie Primärenergieverbrauch, Rohstoffproduktivität oder Treibhausgasemission (Angabe in CO₂-Äquivalenten) rückt zunehmend in den Bereich der Planungsphase und führt zwangsläufig zu einer verstärkten Auseinandersetzung mit dem Baustoff Holz.

Pilotprojekte haben gezeigt, dass vorgefertigte, hochgedämmte Elemente einschließlich Verglasungen und bereits applizierter Fassadenbauteile zusammen mit den bereits sehr weit industrialisierten Rohbautechniken des Stahlbetonfertigbaus ein großes Potenzial für die notwendige Steigerung der Energieeffizienz beinhalten. Zusätzlich besteht die Möglichkeit haustechnische Komponenten und Energiegewinnungsanlagen zu integrieren. Der höhere Vorfertigungsgrad im Bauprozess bewirkt bessere Arbeitsbedingungen in den Fertigungsbetrieben, welche durch die geringeren Mobilitätsanforderungen an die Arbeitnehmer im Vergleich zur Baustelle attraktivere Arbeitsplätze bietet.

Für die Unternehmen des Stahlbetonbaus ergibt sich in Kombination mit dem Holzbau durch die Verwendung nachwachsender Baustoffe die Möglichkeit, Ergebnisse der Ökobilanz im Sinne der gesteigerten Nachhaltigkeit zu verbessern. Für die Unternehmen des Holzbaus ergeben sich deutlich erweiterte Geschäftsfelder im Hochbau. Beide Sparten zusammen können eine weitere Standardisierung, eine Beschleunigung der Bauabläufe und eine noch weiter verbesserte Qualitätssicherung erreichen.

Dennoch kommen in Deutschland vorgefertigte Holzfassadenelemente in neuen Stahlbeton-, Stahl- oder Mischbauweisen praktisch noch selten zum Einsatz. Ein Grund dafür ist, dass es Wissenslücken im Bereich Schallschutz, Brandschutz und Verformungsverträglichkeit gibt und es an einer abgestimmten, durchgängigen Detaillierung fehlt. Eine möglichst vollständig mangelfreie Bauausführung ist zudem die Grundlage nachhaltigen Bauens. Um dabei die Klimaschutzziele zu erreichen ist die Energie- und Ressourceneffizienz der Neubauten bei der Herstellung und im Betrieb zu erhöhen, wozu wesentlich die Optimierung der verwendeten Bauteile und Bauteilanschlüsse gehört.

Der Begriff „Hybridbauweise“ wird in dem Projekt für die Kombination der Holz- und Stahlbetonbauweise auf der Ebene des Gesamtgebäudes verwendet. Sie beschreibt die Verbindung der Gebäudehülle, die überwiegend aus vorgefertigten integralen Holzrahmenbauelementen hergestellt wird, mit der Tragkonstruktion in Schotten- oder Skelettbauweise aus Stahlbeton. Die Abgrenzung des Tragwerks von der Gebäudehülle ist ein wichtiger Aspekt für die Hybridbauweise, die einen Anwendungsbereich, ohne Abweichung von den derzeit gültigen bauordnungsrechtlichen Vorgaben, bis zur Hochhausgrenze (Höhe oberster Geschossfußboden gegenüber mittlerer Geländehöhe ≤ 22 m) ermöglicht. Der Anwendungsbereich ergibt sich aus der Muster-Bauordnung (MBO) bzw. den darauf aufbauenden Landesbauordnungen (LBOs). Die nichttragende Eigenschaft der Außenwandelemente bezieht sich auf brandschutztechnische Schutzziele. Für die gebäudeumhüllenden Bauelemente und deren Fügungen mit der Tragstruktur werden

konstruktive Vorgaben ermittelt, die den Einsatz von Holz bei Gebäuden bis zur Hochhausgrenze baurechtlich auf eine sichere Grundlage stellen.

1.2 Zielstellung

Das Ziel des Vorhabens ist die Weiterentwicklung vorgefertigter Holzfassadenelemente zur Herstellung einer hochgedämmten, energie- und ressourceneffizienten Gebäudehülle unter überwiegender Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen zur Anwendung in Hybridbauwerken mit Stahlbetontragwerken. Hierbei steht die konsequente Verknüpfung der beiden in den genannten Gebieten hervorragend entwickelten Bauweisen im Vordergrund.

In Kombination mit dem Rohbau sollen folgende Aspekte betrachtet und vorhandene Fragestellungen gelöst werden:

- Tragwerksplanung: Entwicklung wirtschaftlich optimierter Anschlüsse zwischen Stahlbetondecken und -wänden unterschiedlicher Ausführung sowie vor- und eingestellten Holzfassadenelementen unter Berücksichtigung der Verformungsverträglichkeit.
- Schallschutz: Flankenübertragung von Körperschall und Trittschall an den hybriden Wand und Deckenanschlüssen.
- Wärmeschutz und Feuchteschutz: Wärmebrückenkatalog für vorgenannte Anschlusssituation.
- Brandschutz: Verhinderung der Brandweiterleitung über Anschlussfugen zwischen Holzfassadenelementen und Stahlbetonbauteilen sowie hinterlüftete Fassadensysteme.

Da zudem zu erwarten ist, dass in Zukunft die Lebenszyklusanalyse (LCA) und Recyclingkonzepte für die verwendeten Bauteile im Rahmen von Vergabeentscheidung und von Zertifizierungssystemen zunehmend Bedeutung erlangen, werden für die jeweiligen Bauprodukte und Bauarten (Bauprodukten-Verordnung - BauPVO: Produkte und Bausätze) entsprechende Bewertungen der CO₂-Äquivalente, der Grauen Energie etc. bereitgestellt, um für Planer und Investoren klare Entscheidungsvorgaben zu geben.

Aus den theoretischen und experimentellen Untersuchungen soll ein standardisierter Katalog für die Anwendung von vorgefertigten Holzbauerelementen als Fassadenhüllkonstruktion von Stahlbeton-Hochbauwerken hervorgehen. Der Konstruktionskatalog soll eine umfassende systematische Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten und Kombinationen enthalten. Die Anwendung umfasst vorrangig Standardgebäude nach Musterbauordnung (MBO), z.B. Wohn- und Bürogebäude bis zur Hochhausgrenze sowie Sonderbauten, z.B. Schulen und Beherbergungsstätten, bei denen anhand schutzzielorientierter Betrachtungen brandschutztechnisch gleichwertige Lösungen umsetzbar sind. Die Ergebnisse sollen so hinterlegt werden, dass eine unmittelbare, baurechtlich gesicherte Verwendung durch die am Bau beteiligten Unternehmen erfolgen kann.

Durch die Abrundung und das Schließen verbliebener Wissenslücken sowie der abschließenden Bereitstellung einer umfassenden Planungs- und Ausführungsinformation werden in Zukunft sowohl national und international tätige Planungs- wie auch Bauindustrieunternehmen in die Lage versetzt, entsprechende Hybridbauweisen auf gesicherter technischer Grundlage anwenden zu können. Durch die Kombination der Materialien Stahlbeton und Holz können für die jeweiligen Bauteile die optimal geeigneten Werkstoffe eingesetzt werden. Zudem entsteht für die Bauindustrie im Vergleich zur heutigen Praxis eine Alternativlösung zu den bisher im Regelfall hochpreisig angesiedelten hochgedämmten Fassadensystemen auf Basis von Metallständern und üblichen Massivbauweisen mit Wärmedämmverbundsystemen auf EPS-Basis. Im Ver-

gleich zur letzten genannten Variante ist die untersuchte Form der Hybridbauweise eine zwar derzeit noch teurere aber auch leichtere, recycling- und umweltfreundlichere Variante mit Mehrwert.

1.3 Umsetzung

Zur Lösung der Aufgabenstellung wurde ein integrales Team aus Wissenschaft und Praxis zusammengestellt. Um den Stand von Wissenschaft und Forschung einfließen zu lassen, haben sich die Lehrstühle Holzbau und Baukonstruktion (federführend), Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen sowie Bauen und Massivbau zusammengeschlossen. Zur externen Mitarbeit wurde das Schallschutzprüfzentrum des Instituts für Fenstertechnik Rosenheim (ift) hinzugezogen.

Der projektbegleitende Ausschuss hat sich aus Vertretern der Firmen Gumpp & Maier, Huber & Sohn, Merk Timber (Züblin), Ketonia, Krämmel und Geiger sowie der Bayerischen Bauwirtschaft gebildet.

Die Meilensteine des Projektes definieren sich wie folgt:

1. Systematisierte Zusammenstellung des Standes der Technik aus den beteiligten Wissensgebieten für die vorgesehene Hybridbauweise (Kapitel 2 und 3)
2. Evaluierung bestehender Projekte und Identifizierung bestehender Defizite (Kapitel 4)
3. Abstimmung offener Fragen mit Planern und Unternehmen des Baugewerbes sowie Identifizierung und Festlegung der zu bearbeitenden Konstruktionen
4. Abstimmung mit Planern und Unternehmen der Bauindustrie und des Baugewerbes über die erarbeiteten Lösungen
5. Erarbeitung eines Konstruktionskataloges und Erstellung eines Abschlussberichtes

Nachfolgend sind die Meilensteine in Abhängigkeit der von der Projektlaufzeit dargestellt.

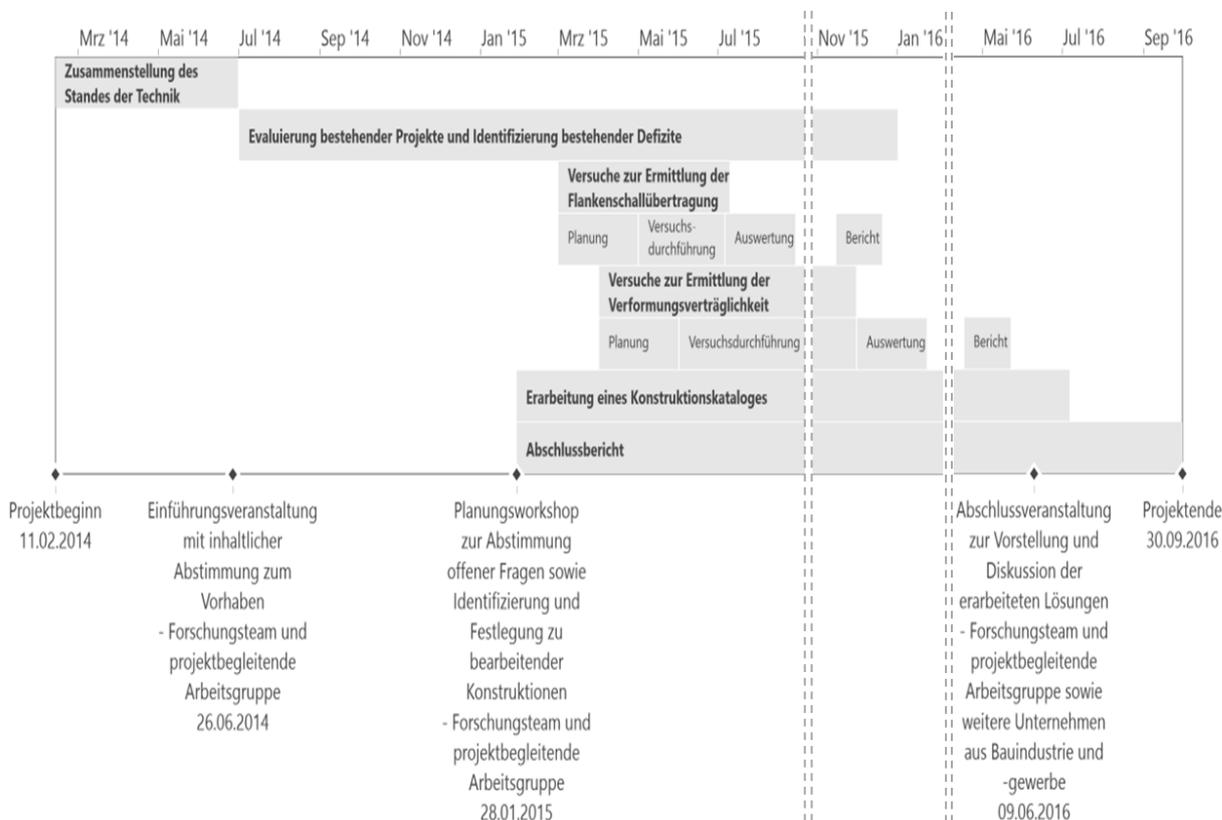


Abbildung 1-1: Projektablauf und Meilensteine (Eigene Darstellung)

Mit dem projektbegleitenden Ausschuss, d.h. Planern und Unternehmen der Bauindustrie und des Baugewerbes wurden offene Fragen und die zu bearbeitenden Konstruktionen abgestimmt. Grundlegende Details für den Konstruktionskatalog wurden in einem Workshop entwickelt. Die Teilnehmer setzten sich aus dem Forscherteam und ausführenden Unternehmen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe zusammen. Zur effizienteren Entwicklung der vertikalen und horizontalen Detailanschlüsse zwischen den Holzrahmenbauelementen und dem Stahlbetontragwerk wurde das Condetti®-System verwendet. Die entwickelten Details bildeten gleichzeitig die Grundlage für die Schallversuche beim ift Rosenheim Abteilung Bauakustik.

Zu den Laboruntersuchungen wurden nachfolgende aufgeführte Berichte erstellt:

- a) Projektbericht 14-001534-PR01 (PB-F02-04-de-01): Bestimmung der Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f}$ einer Außenwand in Holztafelbauweise nach DIN EN ISO 10848-2:2006-08, Bewertung nach DIN EN ISO 717-1:2013-06; Bestimmung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} einer Stoßstelle zwischen einer Trenndecke bzw. -wand in Massivbauweise und einer Außenwand in Holztafelbauweise nach DIN EN ISO 10848-1:2006-08, Bewertung nach DIN EN ISO 10848-1:2006-08; Bestimmung des Norm-Trittschallpegels L_n einer Betondecke mit schwimmendem Estrich und flankierender Holzständerwand nach DIN EN ISO 10140-3:2010-12, Bewertung nach DIN EN ISO 717-2:2013-06, Ersteller: ift Rosenheim, Datum 15.12.2015 (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)
- b) Untersuchungsbericht Nr. 01-CV-23168829: Großformatige Bauteilversuche hinsichtlich Biegung, Querkraft und Torsion unter Dauerlast - Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens Fassadenelemente in Hybridbauweise der Lehrstühle Holzbau und Baukonstruktion, energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen sowie Massivbau, Ersteller: TUM MPA BAU München, Datum 17.05.2016 (Untersuchungsbericht Nr. 01-CV-23168829, 2016)

Die Untersuchungsergebnisse sind nachfolgend im Abschlussbericht und in dem Konstruktionskatalog direkt oder indirekt aufgeführt.

2 Stand der Technik

2.1 Europäisches Harmonisierungskonzept

Das europäische Harmonisierungskonzept wird behandelt, um zum einen Begrifflichkeiten und zum anderen Leistungseigenschaften und –merkmale zu definieren. Das grundlegende Dokument für die Angabe der Leistung von Bauprodukten in Bezug auf ihre wesentlichen Merkmale und ihre Verwendung in Bauwerken ist die am 01. Juli 2013 in Kraft getretene Bauproduktenverordnung (BauPVO, 2011). Sie regelt sowohl das Inverkehrbringen als auch die Bereitstellung von Bauprodukten auf dem Markt durch die Aufstellung von harmonisierten Regeln.

Die Grundanforderungen, die Einfluss auf den Entwurf und die Konstruktion von Bauelementen nehmen, sind darin wie folgt definiert:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
2. Brandschutz
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
4. Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
5. Schallschutz
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz
7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

In Art. 2 BauPVO sind u.a. die Begrifflichkeiten „Bauprodukt“, „Bausatz“, „Wesentliche Merkmale“, „Leistung eines Bauprodukts“ und „Leistungsstufe“ definiert:

- Bauprodukt:
„jedes Produkt oder jeder Bausatz, das beziehungsweise hergestellt und in Verkehr gebracht wird, um dauerhaft in Bauwerke oder Teile davon eingebaut zu werden, und dessen Leistung sich auf die Leistung des Bauwerks im Hinblick auf die Grundanforderungen an Bauwerke auswirkt“
- Bausatz:
„ein Bauprodukt, das von einem einzigen Hersteller als Satz von mindestens zwei getrennten Komponenten, die zusammengefügt werden müssen, um ins Bauwerk eingefügt zu werden, in Verkehr gebracht wird“
- Wesentliche Merkmale:
„diejenigen Merkmale des Bauprodukts, die sich auf die Grundsatzanforderungen beziehen“
- Leistung eines Bauproduktes:
„die Leistung in Bezug auf die relevanten ‚Wesentlichen Merkmale‘ eines Bauproduktes, die in Stufen oder Klassen oder in einer Beschreibung ausgedrückt wird“
- Leistungsstufe:
„das Ergebnis der Bewertung der Leistung eines Bauproduktes in Bezug auf seine wesentlichen Merkmale ausgedrückt als Zahlenwert“

Anders als die vorhergehende Bauproduktenrichtlinie (BRL), die eine Umsetzung in nationales Recht über das Bauproduktengesetz (BauPG) erforderte, gilt die Verordnung in allen europäischen Mitgliedsstaaten gleichermaßen. In der Hoheit der Mitgliedsstaaten liegt aber die Festlegung des Sicherheitsniveaus. In Deutschland werden die Anforderungen durch einheitliche Rechts- und Verwaltungsvorschriften in der Bauministerkonferenz definiert. Zum Beispiel wird in dem Gremium die Muster-Bauordnung abgestimmt,

welche die Grundlage der Landesbauordnung (LBO) der einzelnen Bundesländer bildet. Zu den weiteren Rechts- und Verwaltungsvorschriften zählen, z.B. die Muster-Beherbergungsstättenverordnung (MBeVO, 2000) und die Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO, 2005).

Aufgrund der Gesetzgebungskompetenz der Länder kann es zu Abweichungen von den Mustervorschriften und –erlassen kommen. Auf Grundlage des Systems entstehen nicht nur Unterschiede auf europäischer Ebene, sondern auch in Deutschland auf Ebene der Bundesländer.

2.2 Tragwerk

2.2.1 Grundlagen

Die Tragwerksplanung ist durch einen qualifizierten Tragwerksplaner zu erstellen. Die Qualifikation wird durch die Nachweisberechtigung für Standsicherheit bescheinigt, die die zuständige Ingenieurkammer des jeweiligen Bundeslandes ausstellt. Die statische Berechnung kann je nach Problemstellung durch verschiedene Arten erfolgen. Angefangen mit einfachen baustatischen Tabellen bis hin zur komplexen, computergestützten numerischen Berechnung ist keine Vorgabe vorhanden. In der heutigen Praxis werden die meisten Berechnungen mit Finite-Element-Programmen, als Stabwerk oder Flächentragwerk, durchgeführt. Die kritische Hinterfragung und Kontrolle der Ergebnisse ist die Pflicht eines jeden Tragwerksplaners. Die Statische Berechnung muss zudem verständlich und nachvollziehbar aufgebaut werden, sodass ein Dritter die Annahmen und Rechengänge nachvollziehen kann.

Im Falle eines erhöhten Schwierigkeitsgrades des Tragwerks ist gegebenenfalls eine Überprüfung der statischen Berechnung und der Ausführungsunterlagen durch einen Prüfsachverständigen für Standsicherheit erforderlich.

2.2.2 Bauweisen mit Stahlbeton

Die grundlegende Tragstruktur von Hochbauwerken wird überwiegend als Stahlbetontragwerk ausgeführt. Im üblichen Hochbau sind heutzutage zwei Bauweisen am weitesten verbreitet. Zum einen ist der Skelettbau und zum anderen ist der Schottenbau zu nennen.



Abbildung 2-1: Dreidimensionales Rechenmodell eines Skelettbaus (Eigene Darstellung)

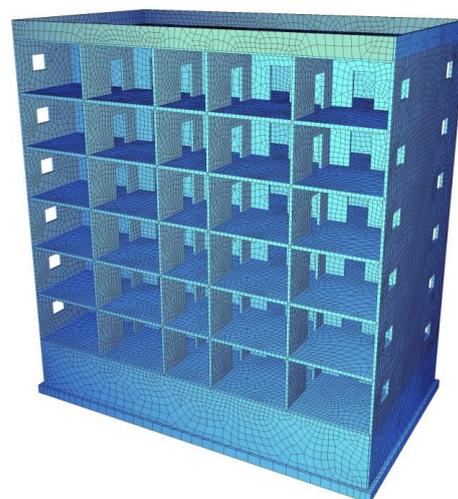


Abbildung 2-2: Dreidimensionales Rechenmodell eines Schottenbaus (Eigene Darstellung)

Für welche Bauweise man sich entscheidet hängt von verschiedenen Gesichtspunkten ab. Diese sind unter anderem:

- Flexibilität des Grundrisses
- Fertigungs- und Planungsaufwand
- Herstellkosten
- Materialbedarf
- Rückbauaufwand

Der wesentliche Vorteil der Skelettbauweise besteht darin, dass eine flexible Grundstruktur vorhanden ist, die lediglich durch das Stützenraster und die Aussteifungskerne beeinflusst wird. Durch nichttragende Trennwände ist eine Umgestaltung der Nutzfläche einfach möglich. Der Einsatz von Flachdecken bei Skelettbauten hat sich heutzutage weiter durchgesetzt. Eine aufwändige Konstruktion mit Unterzügen ist somit nicht zwingend erforderlich. Der Herstellungsaufwand wird reduziert, wodurch die Fertigung beschleunigt werden kann. Weiterhin kann die Technische Gebäudeausrüstung direkt an die Decke montiert werden, sodass weniger tragende Elemente gekreuzt werden müssen. Negativ ist jedoch, dass bei dem Flachdeckensystem hochbelastete Punktlager in Form von Stützen vorhanden sind, bei denen zusätzliche Maßnahmen bei der Planung und Herstellung zu berücksichtigen sind. Insbesondere muss hierbei bei den Stützen eine Durchstanzbewehrung angeordnet werden. Zudem wird an der Oberseite der Deckenplatte eine erhöhte Biegezugbewehrung erforderlich. Aufwändiger zeigt sich auch der statische Nachweis der räumlichen Aussteifung, da nur wenige Wandscheiben vorhanden sind. Dies kann insbesondere in Erdbebengebieten zusätzliche Maßnahmen erfordern. Auf eine aussteifende Funktion der Stützen sollte verzichtet werden. Bei dem Ansatz einer Rahmenausbildung stehen bei Flachdeckensystem nur Querschnitte mit relativ schlanken Abmessungen zur Verfügung, welche relativ geringe Steifigkeiten aufweisen. Die Gesamtbiegesteifigkeit eines Ersatzrahmens ist im Vergleich zu einer Wandscheibe mit den gleichen Abmessungen wesentlich geringer. Die Anordnung der aufwändigen Rahmeneckbewehrung, Durchstanzbewehrung, oberen Biegebewehrung und durchlaufender Stützenbewehrung ist kaum umsetzbar. Eine Rahmenausbildung sollte nur bei Deckensystemen mit Unterzügen angewandt werden. Zum einen weist der Rahmenriegel bzw. der Unterzug eine höhere Steifigkeit auf. Zum anderen können in diesem Fall die Deckenplatten als liniengelagert angesehen werden, wodurch sich die Durchstanznachweise erübrigen.

Der Schottenbau bzw. der Querwandbau wird heutzutage vor allem noch im Wohnungsbau praktiziert. Durch die Querwände werden bereits im Rohbau die einzelnen Bereiche eingeteilt, die in der späteren Nutzung gewünscht sind. Gekennzeichnet ist der Schottenbau durch überwiegend tragende Querwände. Die darüber liegenden Decken werden häufig als einachsiger gespannter Durchlaufträger realisiert, wodurch das statische System einfach ist und klare Strukturen aufweist. Der Nachweis der räumlichen Aussteifung gelingt häufig bei einem Schottenbau leichter als bei einem Skelettbau, da eine ausreichende Anzahl an Wandscheiben vorhanden ist. Allgemein sind der rechnerische Aufwand sowie der Schwierigkeitsgrad des Tragwerks bei einem Schottenbau niedriger einzuschätzen als bei einem Skelettbau. Der wesentliche Nachteil der Schottenbauweise ist die nicht vorhandene Flexibilität der Tragstruktur.

2.2.3 Bemessungskonzept

In Kapitel 2.1 wurde bereits auf das Harmonisierungskonzept der europäischen Normen im Bauwesen eingegangen. In der DIN EN 1990 (DIN EN 1990, 2010) sind die Grundlagen der Tragwerksplanung geregelt. Als Grundlage der weiteren Normen DIN EN 1991 bis DIN EN 1999 sind darin Anforderungen an die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit eines Tragwerks dargestellt. In der DIN EN 1990 werden zwei grundlegende Grenzzustände beschrieben, zum einen der Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und zum anderen der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird die Standsicherheit und Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Funktion des Tragwerks sichergestellt. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit begrenzt unter anderem die Verformungen von Bauteilen. Das Nachweisformat nach DIN EN 1990 lautet:

Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

$$E_d \leq R_d$$

E_d = Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen

R_d = Bemessungswert der Tragfähigkeit

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

$$E_d \leq C_d$$

E_d = Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen

C_d = Bemessungswert der Grenze für das maßgebliche Gebrauchstauglichkeitskriterium

Für die Nachweisführung werden unterschiedliche Einwirkungskombinationen herangezogen, um die Häufigkeit des Auftretens einer Last während der Lebensdauer eines Bauteils zu erfassen. Die ständigen Lasten wie das Eigengewicht werden mit einem "G" gekennzeichnet. Wohingegen die veränderlichen Lasten wie Nutz-, Wind-, Schnee- oder Erbebenlasten mit einem "P", "Q" bzw. "A" benannt werden. Die Teilsicherheitsbeiwerte γ_G und γ_Q werden entsprechend der Bemessungssituation gewählt. Veränderliche Lasten werden in Abhängigkeit von ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit mit Kombinationsbeiwerten ψ_i abgemindert. Zur normalen Bauteilbemessung verwendet man für den Grenzzustand der Tragfähigkeit die ständige und vorübergehende Bemessungssituation. Für Verformungsberechnungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wählt man die quasi-ständige Einwirkungskombination. Im Folgenden sind beide genannten Einwirkungskombinationen angegeben, welche aus der DIN EN 1991-1-1 entnommen werden können.

- Einwirkungskombinationen im GZT

ständige oder vorübergehende Bemessungssituation (Grundkombination):

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \psi_{Gj} \cdot G_{kj} + \psi_P \cdot P_k + \psi_{Qk,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2-1)$$

- Einwirkungskombinationen im GZG

quasi-ständige Einwirkungskombination (Langzeitauswirkungen auf Tragwerk):

$$E_{d,perm} = \sum_{j \geq 1} G_{kj} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2-2)$$

- Bemessungswert der Tragfähigkeit:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (2-3)$$

mit:

R_k charakteristischer Bauteilwiderstand

γ_M Teilsicherheitsbeiwert des Materials

Das vorgestellte Bemessungskonzept beruht im Wesentlichen auf Teilsicherheitsbeiwerten. Das sogenannte semiprobabilistische Sicherheitskonzept, welches in den Europäischen Baunormen implementiert ist, stützt sich zum einen auf statistische Daten und zum anderen auf Erfahrungswerte des deterministischen Sicherheitskonzepts. Sowohl die Baustoffeigenschaften als auch die Einwirkungen sind streuende Größen. In Abbildung 2-3 sind die Verteilungsfunktionen der Einwirkung E und des Widerstands R dargestellt. Die nominale Sicherheitszone ergibt sich aus dem Abstand der charakteristischen Werte E_k und R_k , welche zur Führung von statischen Nachweisen noch durch die Teilsicherheitsbeiwerte ungünstig beeinflusst werden.

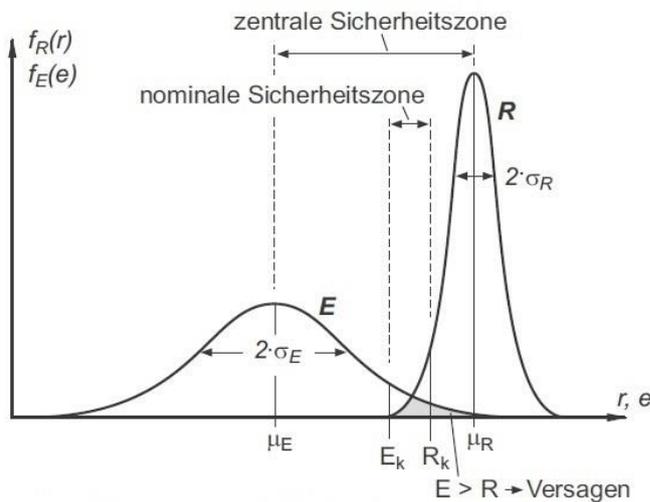


Abbildung 2-3: Definition der Sicherheitszonen (Zilch, K. & Zehetmaier, G., 2010, S. 30)

Die DIN EN 1990 gibt zudem die Möglichkeit vor, dass die Teilsicherheitsbeiwerte auch individuell bestimmt werden können.

$$\gamma_E = \frac{E_d}{E_k} = \frac{1 + \beta \cdot \alpha_E \cdot V_E}{1 + K_{p,E} \cdot V_E} \quad (2-4)$$

$$\gamma_R = \frac{R_d}{R_k} = \frac{1 + K_{p,R} \cdot V_R}{1 + \beta \cdot \alpha_R \cdot V_R} \quad (2-5)$$

mit:

β das angestrebte Zuverlässigkeitsniveau

$K_{p,R}, K_{p,E}$ Quantilverteilungen der Widerstände und Einwirkungen

V_R, V_E Streuungsparameter der Widerstände und Einwirkungen

α_R, α_E Wichtung der Streuungen (Zilch, K. & Zehetmaier, G., 2010, S. 30)

Für die jeweilige Bauart sind in den entsprechenden Normen die Teilsicherheitsbeiwerte tabelliert vorgegeben. Die Kombinationsbeiwerte ψ_i nach EN 1990 sind in Anhang A1 angegeben. (DIN EN 1990, 2010) Die in der statischen Berechnung anzusetzenden Lasten sind in DIN EN 1991 geregelt. Eine Verfeinerung der Einwirkungen wird durch eine Untergliederung sichergestellt. Diese sind:

- EN 1991-1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau (DIN EN 1991-1-1, 2010)
- EN 1991-1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke (DIN EN 1991-1-2, 2010)
- EN 1991-1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten (DIN EN 1991-1-3, 2010)
- EN 1991-1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten (DIN EN 1991-1-4, 2010)
- EN 1991-1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen (DIN EN 1991-1-5, 2010)
- EN 1991-1-6: Allgemeine Einwirkungen, Einwirkungen während der Bauausführung (DIN EN 1991-1-6, 2010)
- EN 1991-1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen (DIN EN 1991-1-7, 2010)

Bei der Bemessung von Fassaden ist ein primärer Lastfall die Windeinwirkung. Mithilfe der DIN EN 1991-1-4 und dem dazugehörigen Nationalen Anhang können die Windlasten ermittelt werden. Der einwirkende Winddruck auf eine Außenfläche wird wie folgt angesetzt:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (2-6)$$

mit:

$q_p(z_e)$ Böengeschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit der Bezugshöhe z_e

c_{pe} aerodynamischer Beiwert für den Außendruck

Zur Ermittlung des Böengeschwindigkeitsdrucks muss zunächst die Windzone bestimmt werden. Gemäß DIN EN 1991-1-4/NA erfolgt eine grafische Zuordnung. Die Geschwindigkeitsdrücke $q_{b,0}$ weisen eine Gültigkeit bis zu einer Meereshöhe von 800 m über NN auf. Liegt der Bauwerksstandort darüber, sind gesonderte Betrachtungen gemäß DIN EN 1991-1-4/NA Anhang A2 erforderlich.

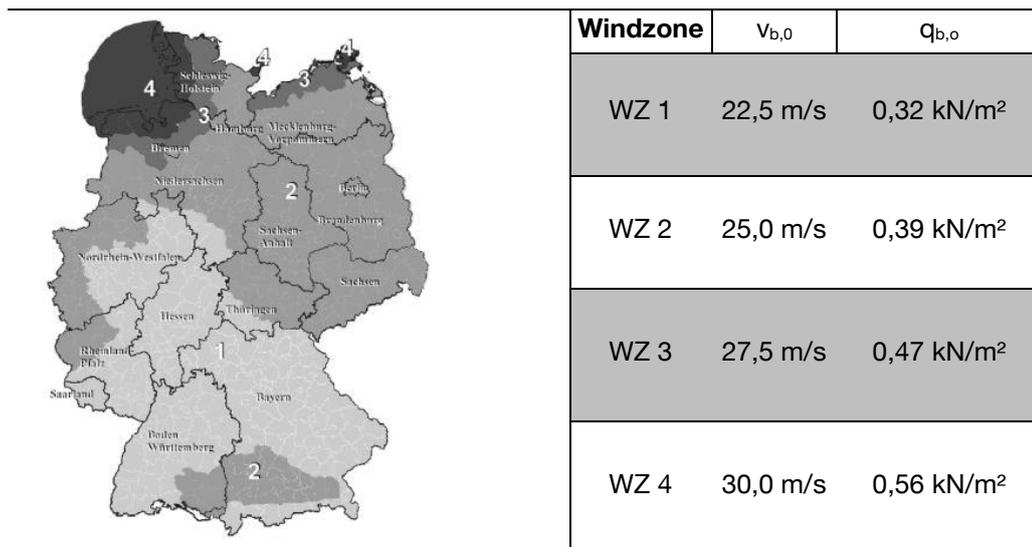


Abbildung 2-4: Windzonenkarte und Geschwindigkeitsdrücke nach DIN EN 1991-1-4/NA (DIN EN 1991-1-4/NA, 2010)

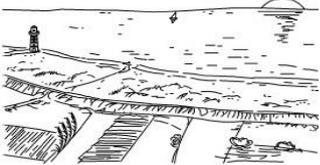
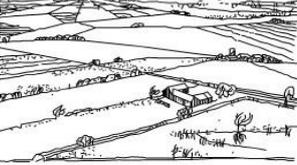
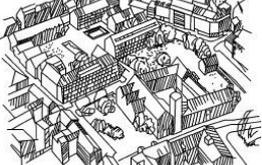
Geländekategorien			
I	II	III	IV
			
Offene See, Seen mit mindestens 5km freier Fläche in Windrichtung, flaches Land ohne Hindernisse	Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z.B. landwirtschaftliches Gebiet	Vorstädte, Industrie oder Gewerbegebiete; Wälder	Stadtgebiete, bei denen mindestens 15% der Fläche mit Gebäuden bebaut sind, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet

Abbildung 2-5: Geländekategorien nach DIN EN 1991-1-4/NA (DIN EN 1991-1-4/NA, 2010)

Anschließend wird der Böenschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit der Bezugshöhe ermittelt. Für Deutschland werden gemäß DIN EN 1991-1-4 drei Fälle unterschieden:

1. Binnenland (Mischprofil der Geländekategorien II und III)
2. Küstennahe Gebiete sowie auf Inseln der Ostsee (Mischprofil der Geländekategorien I und II)
3. Inseln der Nordsee

Zur Vereinfachung werden die zugrunde liegenden Formeln für das Binnenland (Mischprofil der Geländekategorien II und III) und küstennahe Gebiete sowie Inseln auf der Ostsee (Mischprofil der Geländekategorien I und II) in Abhängigkeit der Bezugshöhe bis hin zur Hochhausgrenze ausgewertet und dienen nachfolgend als Berechnungshilfe.

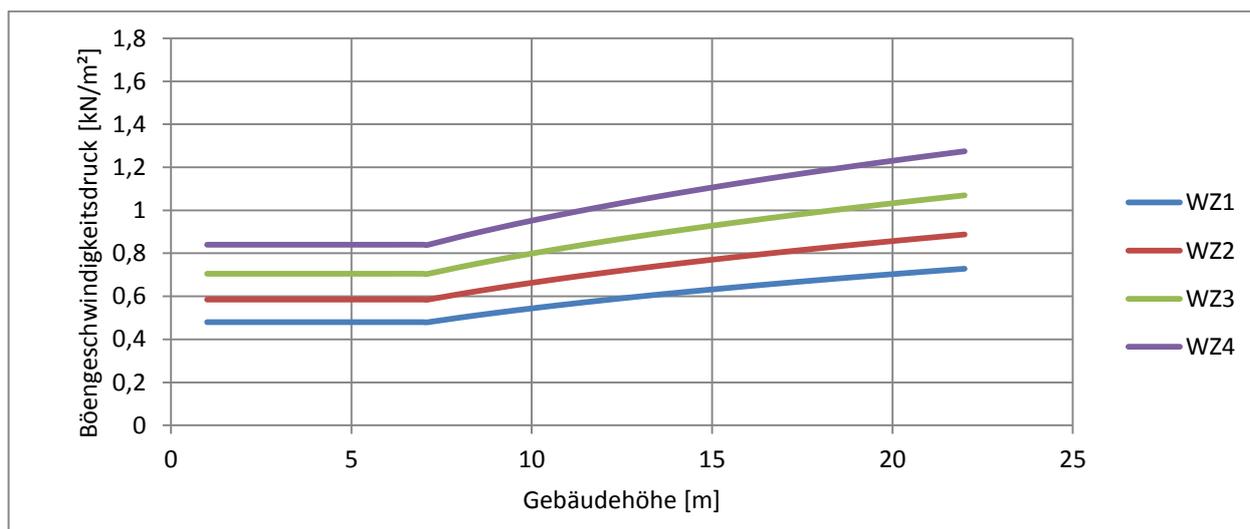


Abbildung 2-6: Binnenland - Mischprofil der Geländekategorien II und III (Eigene Darstellung)

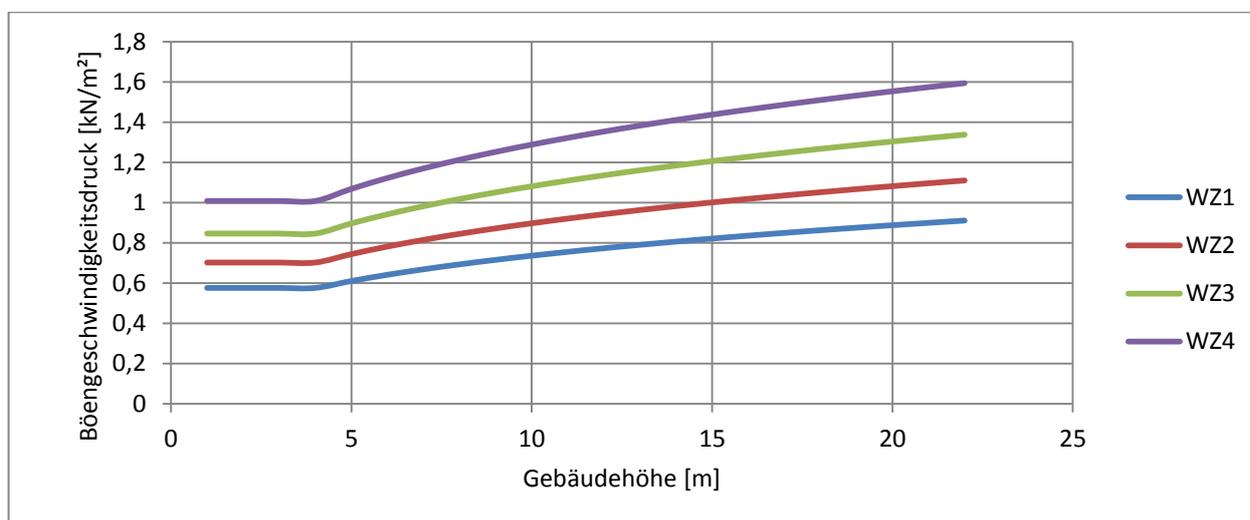


Abbildung 2-7: Küstennahe Gebiete sowie auf Inseln der Ostsee - Mischprofil der Geländekategorien I und II (Eigene Darstellung)

Zur Ermittlung der charakteristischen Windlasten ist noch der aerodynamische Beiwert c_{pe} in Abhängigkeit von den Bauwerksabmessungen und der Lasteinzugsfläche A des zu betrachtenden Bauteils zu bestimmen. Für eine Lasteinzugsfläche $A > 10 \text{ m}^2$ wird der Wert $c_{pe,10}$ und $A < 1,0 \text{ m}^2$ der Wert $c_{pe,1}$ gewählt. Zwischenwerte können nach Gleichung 2-7 ermittelt werden:

$$c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A \quad (2-7)$$

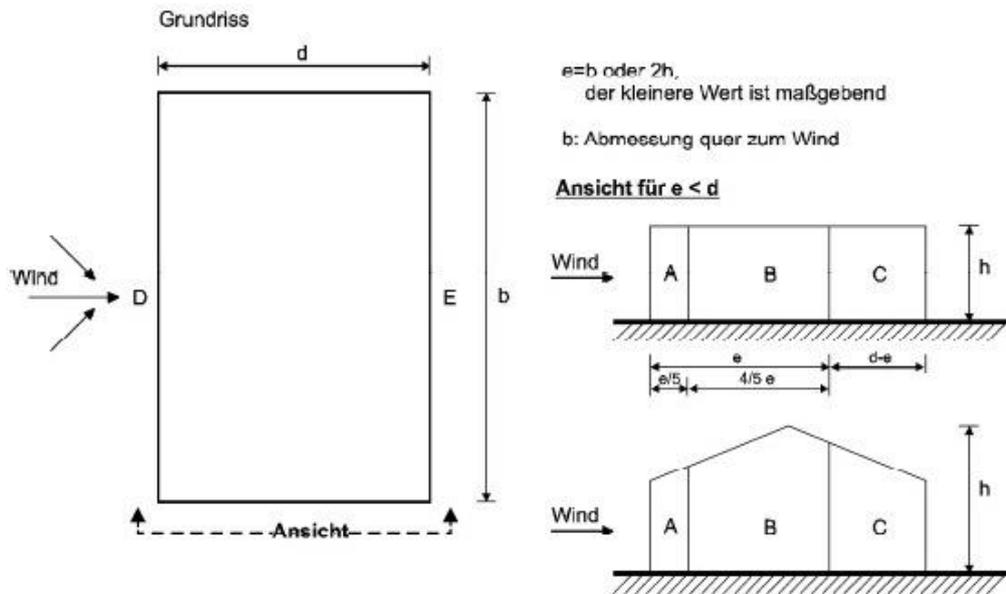


Abbildung 2-8: Einteilung der vertikalen Wandflächen in Bereiche nach DIN EN 1991-1-4 (DIN EN 1991-1-4, 2010)

Tabelle 2-1: Außendruckbeiwerte nach DIN EN 1991-1-4 (DIN EN 1991-1-4, 2010) in Abhängigkeit der Gebäudeproportionen und Bereichen für vertikale Wände und rechteckigen Gebäudegrundriss

Bereich	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$								
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0		-0,3

Weitere Außendruckbeiwerte für verschiedenste Wand- oder Dachsituationen sind der DIN EN 1991-1-4 zu entnehmen.

2.2.4 Bauweisen mit Holz

2.2.4.1 Elemente

Im Bereich des Holzbaus ist die Verwendung vorgefertigter Bausysteme weit vorangeschritten. Bausysteme haben den Vorteil einer standardisierten Bauweise mit hohem Vorfertigungsgrad, geringerer Bauzeit und einer wirtschaftlichen Verarbeitung. Im Bereich von Bausystemen für Außenwände lassen sich industriell und handwerklich vorgefertigte Holzbauelemente vereinfachend in die Systembereiche Fassade, Kernelement und Installationsebene einteilen.

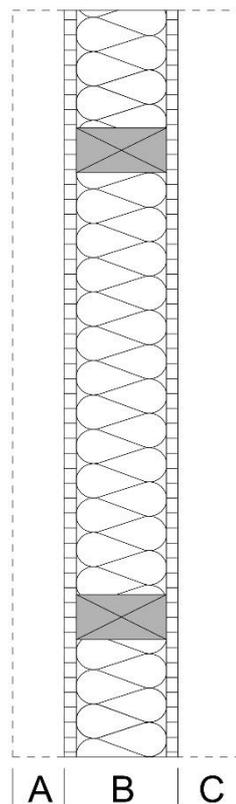


Abbildung 2-9: Systembereiche: A) Fassade, B) Kernelement, C) Installationsebene (Eigene Darstellung)

Das Gebäudetragwerk wird aus Stahlbeton errichtet, an das die nichttragenden Holzfassadenelemente als Gebäudehülle befestigt werden. Die Fassadenelemente fungieren gänzlich als Raumabschluss zur Einhaltung bauphysikalischer Anforderungen und geben die tragende Funktion an das innere Gebäudetragwerk ab. Die somit nichttragenden Fassadenelemente werden je nach Anschlussvariante mit dem Stahlbetontragwerk verbunden bzw. darin integriert und stellen in dieser Kombination eine spezielle Art des Hybridbaus bzw. Mischbaus dar. Die Verwendung meist einfacher Konstruktionen in Form von geschosshohen, vorgefertigten Holzfassadenelementen hat sich bereits als nichttragende Gebäudehülle etabliert. Vor allem der Holzrahmenbau (HRB) findet vielfach Verwendung als Kernelement der Gebäudehülle. (holzbau handbuch R01 T01 F07, 2009, S. 10)

2.2.4.2 Kernelement

Dem Kernelement werden viele Funktionen auf engem Raum zugeordnet. Die Hauptfunktionen des Kernelements liegen in der Einhaltung des Wärme-, Feuchte-, Schall- und Brandschutzes. Neben diesen bauphysikalischen Anforderungen müssen gleichzeitig statische Anforderungen erfüllt werden. Auch wenn nichttragende Außenwandelemente nicht zur Sicherung der Standsicherheit des Gebäudes herangezogen werden, müssen sie dennoch zumindest ihr Eigengewicht sowie eine Beanspruchung aus Wind aufnehmen können. Somit beinhaltet das Kernelement gleichzeitig die Tragstruktur zur Aufnahme der oben genannten Beanspruchungen, wird aber dennoch aus brandschutztechnischen Gründen als nichttragendes Außenwandelement behandelt. Die tragende Funktion übernimmt im Falle des Holzrahmen- bzw. Holztafelbaus ein stabförmiges Traggerippe bestehend aus vertikalen Ständern sowie horizontaler Schwelle und Rähm aus Konstruktionsvollholz oder gegebenenfalls aus Brettschichtholz (siehe Abbildung 2-10).

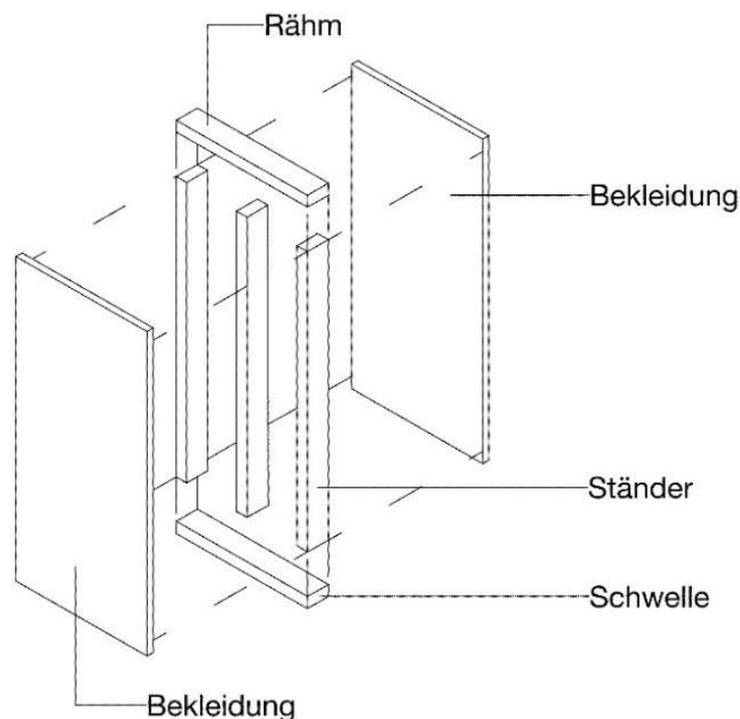


Abbildung 2-10: Aufbau einer Holzrahmenbauwand (Eigene Darstellung)

In einer Ebene mit dem Traggerippe liegt die Dämmung. Stabilisierende, beidseitige Bekleidung aus Holzwerkstoff-, Gipsfaser-, oder Gipskartonplatten schließen das Kernelement flächig zu einem beidseitig geschlossenen und hohlraumfrei gedämmten Holzrahmenbau-Element ab. Meistens sichert die Bekleidung zusätzlich die Schutzziele der Luft- und Winddichtheit. Sowohl Dämmung als auch Bekleidung übernehmen somit hauptsächlich bauphysikalische Funktionen (siehe Kapitel 2.4 ff.). In Tabelle 2-2 werden gängige Abmessungen der Holzrahmenbauelemente aufgezeigt. Zur Aufnahme der Eigen- und Windlasten ist eine Mindestquerschnittshöhe bzw. -tiefe der Ständer von 140 mm erforderlich. (siehe Kapitel 2.2.4.5)

Tabelle 2-2: Abmessungen der Konstruktionselemente einer HRB-Wand (Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., o.J.)

Konstruktionselement	Abmessungen
Ständer:	b x h
KVH	60 – 140 mm x 120 – 240 mm
BSH	60 – 180 mm x 120 – 400 mm
Achsmaß	625 / 833 mm
Standardlänge	12 - 20 m
Rähm / Schwelle	b x h
KVH	60 – 140 mm x 120 – 240 mm
BSH	60 – 180 mm x 120 – 400 mm
Standardlänge	12 - 20 m
Platten	1250 x 2500 mm 2500 x 5000 mm
Plattenstärke	12,5 – 15 mm

Maßgebend für die Dimensionierung der Wanddicke ist in der Regel der Nachweis aller bauphysikalischen Anforderungen. Die erforderlichen Schichtdicken ergeben den erforderlichen Gesamtwandquerschnitt. Kann oder soll der Wärmeschutz nicht allein durch die Gefachdämmung gewährleistet werden, muss eine zusätzliche Dämmung raumseitig in der Installationsebene und außenseitig durch ein Wärmedämmverbundsystem aufgebracht werden.

2.2.4.3 Fassade

Der im Kapitel 2.10 aufgezeigte Holzschutz bedingt, dass zum Schutz des Kernelements ein wirksamer Wetterschutz in Form einer Fassade angebracht wird. Unterschieden werden hierbei hinterlüftete und nicht hinterlüftete Fassaden. Eine hinterlüftete Fassade kann in Form einer Vorsatzschale ausgeführt werden. Eine spezielle Form der hinterlüfteten Fassade stellt eine unterlüftete Fassade dar, die nur von unten ent- sowie belüftet wird. Nicht hinterlüftet ist dagegen eine Kompaktfassade in Form eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) als Außendämmung und eines äußeren Putzsystems. (DIN 68800-2, 2012) Ein WDVS zählt zu den nicht geregelten Bauprodukten gemäß Bauregelliste B Teil 1. Daher ist für ein WDVS eine Europäische Technische Bewertung (engl. European Technical Assessment - ETA) auf Grundlage eines Europäischen Bewertungsdokumentes (engl. European Assessment Document - EAD) erforderlich, um das System in Deutschland bzw. der EU im Umlauf bringen zu können. Dabei ist zwingend auf die Verwendung geeigneter Einzelkomponenten des WDVS gemäß entsprechender ETA zu achten.

Als äußerer Wandabschluss beeinflusst die Fassade aus architektonischer Sicht maßgeblich das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes. Durch die Wahl eines Fassadensystems lassen sich demnach Akzente setzen. (Kolb, 2007) Neben einem Putzsystem sind u.a. Schiefer-, Ziegel und Metallfassaden oder Außenwandbekleidungen aus Holz, Holzwerkstoff- und Faserzementplatten möglich. (Schopbach, 2014, Abschnitt 13.1)

In den folgenden Skizzen werden beispielhaft horizontale Schnitte zweier Wandaufbauten mit einer Vorsatzschale bzw. einer Kompaktfassade dargestellt.

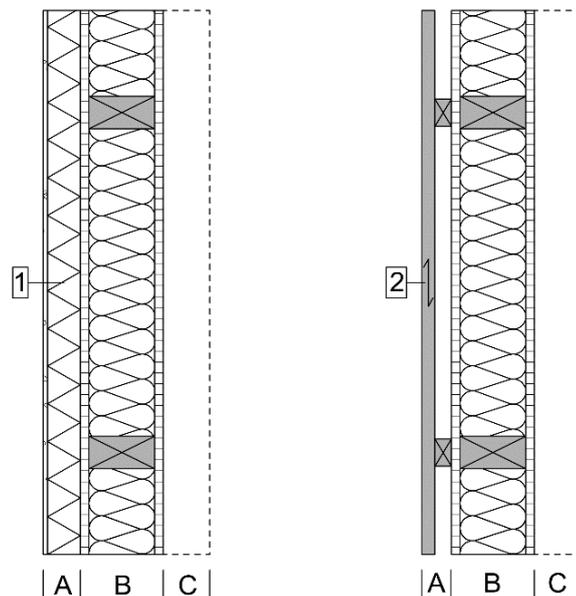


Abbildung 2-11: Wandaufbauten 1) Kompaktfassade + Kernelement, 2) Hinterlüftete Fassade + Kernelement (Eigene Darstellung)

2.2.4.4 Installationsebene

Das Holzrahmenbauelement vereint viele Funktionen auf engem Raum u.a. gute Dämmeigenschaften in Verbindung mit geringer Wanddicke und leichter Konstruktion. Nach vollständiger Montage ist es von Vorteil, wenn Installationsmedien unabhängig von der vorgefertigten Gebäudehülle, bestehend aus dem Kernelement und ggfs. schon applizierter Fassade, integriert werden können. Dies kann durch eine raumseitig angebrachte Vorsatzschale erreicht werden, deren zunächst offener Hohlraum die Möglichkeit zur baustellenseitigen Verlegung von Installationen schafft. (Kolb, 2007, S. 68)

Die innenseitige Verlagerung der Installationsmedien reduziert ebenfalls die Fehlerhäufigkeit bei der lückenlosen Herstellung der Luftdichtheitsebene und wirkt sich in der Folge positiv auf die Dämmeigenschaften der Wandelemente aus.

In den folgenden Skizzen werden erneut die zwei Beispiele für Wandaufbauten im horizontalen Schnitt diesmal zusätzlich mit einer vorgesetzten Installationsebene dargestellt.

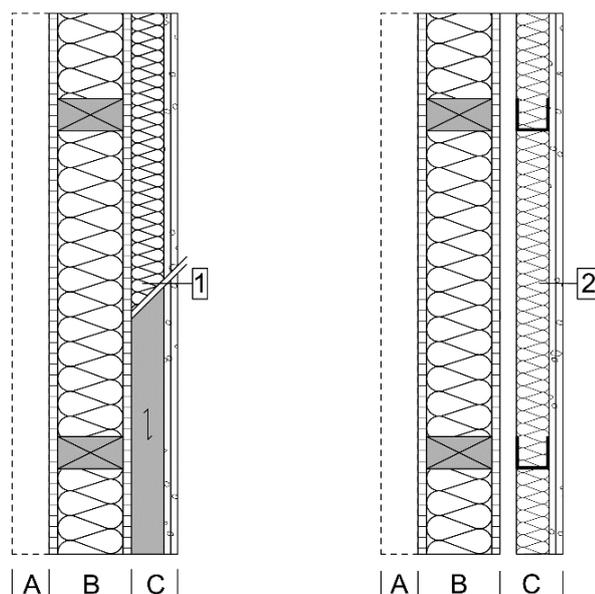


Abbildung 2-12: Wandaufbauten 1) Kernelement + direkt verbundener Installationsebene, 2) Kernelement + mit Abstand vorge-setzter Installationsebene (Eigene Darstellung)

2.2.4.5 Bemessung der nichttragenden Holzrahmenbauelemente

Die Querschnittsgrößen des Traggerippes des Kernelements hängen zum einen von den erforderlichen Schichtdicken der Gefachdämmung und zum anderen von dem aus statischer Sicht erforderlichen Querschnitt ab. Der Querschnitt dient zur Abtragung der in der Außenwand wirkenden horizontalen Lasten, sowie im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante der vertikalen Lasten.

Maßgebende Tragfähigkeitsnachweise für die nichttragenden, geschossweise befestigten Elemente sind hierbei Nachweise aus Windbeanspruchung senkrecht zur Wand. Je nach Gebiet werden Windlasten in Windzonen eingeteilt (siehe Abschnitt 0). In Abhängigkeit von dieser Windzone WZ, der Geländekategorie sowie der Bezugshöhe z am Gebäude wird ein charakteristischer Wert des Böengeschwindigkeitsdrucks $q_p(WZ, z)$ angesetzt. Als realistischer Maximalfall kann von einem Mischprofil der Geländekategorien I und II für als küstennahe Gebiete sowie auf Inseln der Ostsee in Kombination mit einer maximalen Gebäudehöhe von 24 m (Gebäudeklasse < Hochhaus) ausgegangen werden. Der Böengeschwindigkeitsdruck wird nun mit einem Außendruckbeiwert $c_{pe,10}$ kombiniert und als charakteristischer Winddruck angesetzt.

$$w_k(WZ, z) = q_p(WZ, z) \cdot c_{pe,10} \quad (2-8)$$

Der Winddruck wird in Abhängigkeit von der Windzone WZ auf die HRB-Konstruktion angesetzt, welche eine Wandhöhe h_i von 4,00 m bzw. 3,00 m aufweist. Mit einer maximalen Gebäudehöhe von 24 m besitzt das Gebäude sechs bzw. acht Geschosse. Die Ständer werden auf Biegung und Schub nachgewiesen.

Eine Auswertung des erforderlichen Querschnitts des Wandständers lässt sich durch Auflösen der entsprechenden Gleichungen für den Biege- bzw. Schubnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß Eurocode 5 (DIN EN 1995-1-1, 2010) ermitteln. Dabei wurde die Ständerbreite $b = 60$ mm festgelegt und nach der Ständerhöhe h_v bzw. h_M aufgelöst. Die empfohlene Ständerhöhe h stellt das Maximum der beiden Nachweise dar.

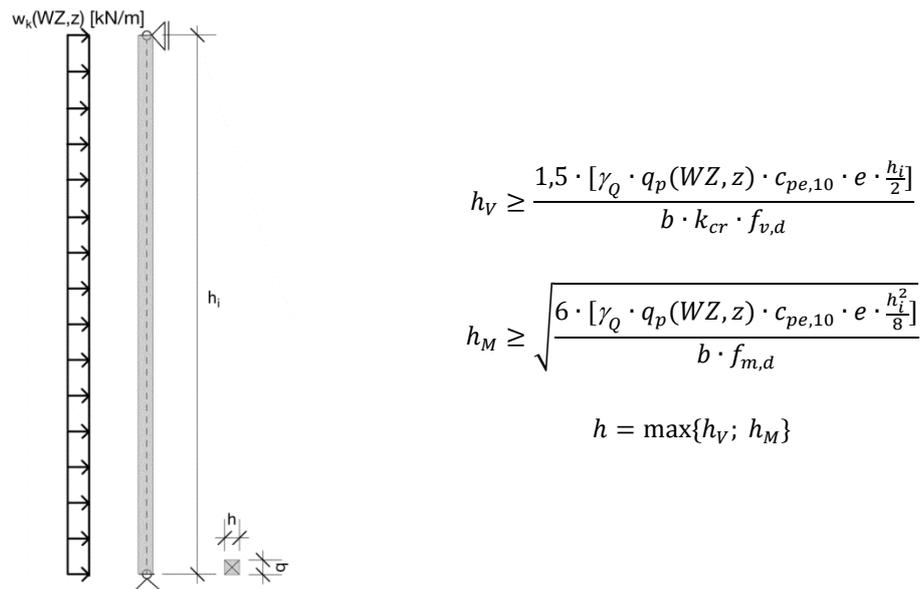


Abbildung 2-13: Horizontale Belastung der nichttragenden Außenwand aus Windbeanspruchung (Eigene Darstellung)

Zusammengefasst lassen sich nachfolgende erforderliche Querschnittswerte ermitteln und in Abhängigkeit der Bezugshöhe z sowie der Windzone WZ grafisch darstellen. Folgende Werte wurden angenommen:

- Küstennahe Gebiete sowie Inseln der Ostsee
- Bezugshöhe: $z \leq 24$ m
- Regelbereich D (gem. DIN EN 1991-1-4), keine Sogspitzen $c_p = 0,8$
- Ständer: $b = 60$ mm, Festigkeitsklasse C 24, $e = 0,833$ m
- Fassadenelementhöhe: $h_i = 3,0$ bzw. $4,0$ m

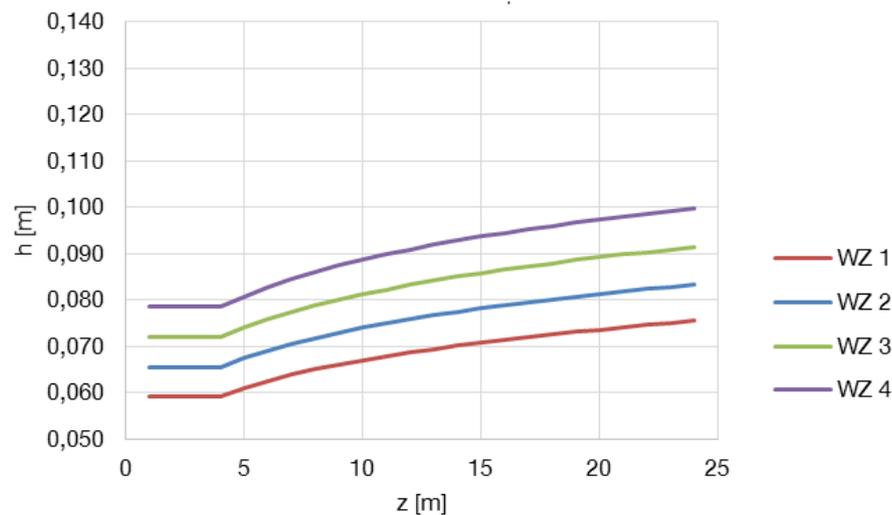


Abbildung 2-14: Empfohlene Ständerhöhe h in Abhängigkeit der Bezugshöhe z sowie der Windzone WZ mit einer Geschosshöhe $h_1 = 3,00$ m (Eigene Darstellung)

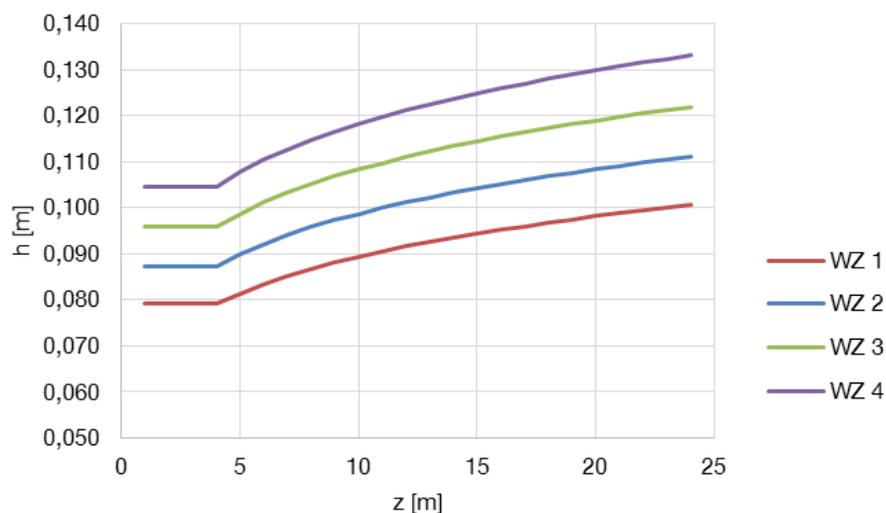


Abbildung 2-15: Empfohlene Ständerhöhe h in Abhängigkeit der Bezugshöhe z sowie der Windzone WZ mit einer Geschosshöhe $h_2 = 4,00$ m (Eigene Darstellung)

Zusammengefasst lassen sich nachfolgende erforderliche Querschnittswerte zur Orientierung festhalten. Die erforderliche Ständerhöhe h orientiert sich am Mindestquerschnitt $b / h = 60$ mm / 120 mm sowie an lieferbaren Querschnittswerten. Ein projektbezogener Nachweis in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen (Gebäudekategorie, Windbereich am Gebäude, tatsächliche Wandhöhe h_i , Ständerabstand e , Materialfestigkeit etc.) ist weiterhin unumgänglich.

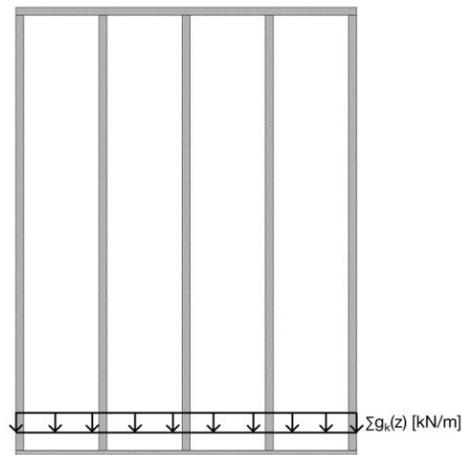
Tabelle 2-3: Empfohlener Ständerquerschnitt innerhalb küstennaher Gebiete sowie Inseln der Ostsee (Mischprofil der Geländekategorie I und II) in Abhängigkeit der Windzone WZ sowie der Bezugshöhe z im Falle einer eingestellten Anschlussvariante (Eigene Darstellung)

Windzone	Bezugshöhe	Gebäudeklasse	Erforderlicher Querschnitt der Ständer $h_1 = 3$ m	Erforderlicher Querschnitt der Ständer $h_2 = 4$ m
WZ 1	$z \leq 24$ m	GK 5	60 x 120 mm ²	60 x 120 mm ²
WZ 2	$z \leq 24$ m	GK 5	60 x 120 mm ²	60 x 120 mm ²
WZ 3	$z \leq 24$ m	GK 5	60 x 120 mm ²	60 x 140 mm ²
	$z \leq 20$ m	GK 5		60 x 120 mm ²
WZ 4	$z \leq 24$ m	GK 5	60 x 120 mm ²	60 x 140 mm ²
	$z \leq 11$ m	GK 4		60 x 120 mm ²

Anmerkung: Diese Orientierungswerte ersetzen nicht die für die Durchführung von Bauvorhaben gesetzlich vorgeschriebenen Genehmigungen, Zustimmungen und Bescheinigungen.

Im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante der nichttragenden Außenwand können die Eigenlastanteile der einzelnen Fassadenelemente, ausgenommen im Brandfall, bis zum Fundament bzw. der Kellerdecke weitergeleitet werden. Bei diesen sogenannten selbsttragenden Außenwänden dominiert der Tragfähigkeitsnachweis des Querdrucks zwischen Ständer und Schwelle im untersten Fassadenelement. Die aufsummierte charakteristische Eigenlast Σg_k wird vertikal auf eine Konstruktion einer HRB-Wand aufge-

bracht. Hierbei wird das charakteristische Eigengewicht der nichttragenden Fassadenelemente mit $g_k = 1,20 \text{ kN/m}^2$ angesetzt, wobei Bezug auf Regelaufbauten des Konstruktionskatalogs genommen wird (siehe Anhang 2). Eine Auswertung des erforderlichen Querschnitts des Wandständers in Abhängigkeit der Bezugshöhe z lässt sich durch Auflösen der entsprechenden Gleichung für den Nachweis des Querdrucks im Grenzzustand der Tragfähigkeit gemäß Eurocode 5 ermitteln. (DIN EN 1995-1-1, 2010, Abschnitt 6.1.5) (DIN EN 1995-1-1/NA, 2013) Dabei wurde die Ständerbreite $b = 60 \text{ mm}$ festgelegt und nach der Ständerhöhe h aufgelöst.



$$h \geq \frac{\gamma_G \cdot \sum g_k \cdot e}{b_{ef} \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}}$$

$$= \frac{\gamma_G \cdot g_k \cdot z \cdot e}{(b + 2\ddot{u}) \cdot k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}}$$

Abbildung 2-16: Vertikale Belastung der nichttragenden Außenwand aus Summe der Eigenlast $\sum g_k$ im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante (Eigene Darstellung)

Zusammengefasst lassen sich nachfolgende erforderliche Querschnittswerte ermitteln und in Abhängigkeit der Bezugshöhe z grafisch darstellen. Folgende Werte wurden angenommen:

- Bezugshöhe: $z \leq 24 \text{ m}$
- Ständer: $b = 60 \text{ mm}$, Festigkeitsklasse C24, $e = 0,833 \text{ m}$
- Fassadenelementhöhe: $h_i = 3,0$ bzw. $4,0 \text{ m}$
- Fassadeneigengewicht: $g_k = 1,20 \text{ kN/m}^2$
- Beiwert zur Berücksichtigung des Einhängeeffekts sowie der Druckzone: $k_{c,90} = 1,25$ (kontinuierliche Unterstützung)
- Überstand: $\ddot{u} = 30 \text{ mm}$

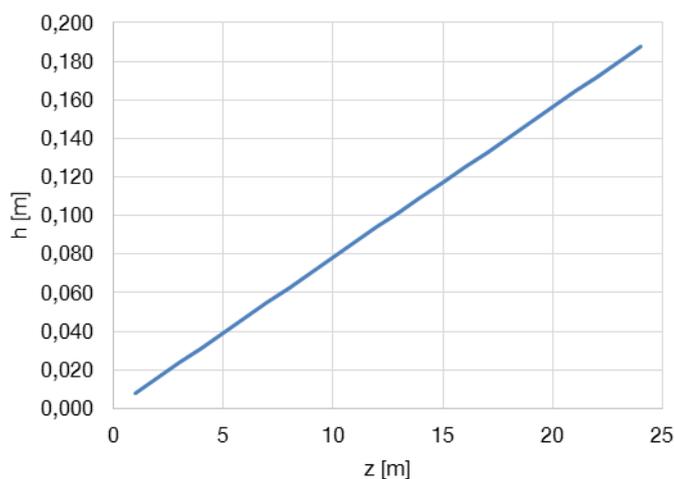


Abbildung 2-17: Empfohlener Ständerhöhe h in Abhängigkeit der Bezugshöhe z im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante (Eigene Darstellung)

Die lineare Abhängigkeit zwischen Bezugshöhe z sowie Ständerhöhe h zeigt Abbildung 2-17, woraus sich wiederum erforderliche Querschnittswerte zur Orientierung festhalten lassen. Die erforderliche Ständerhöhe h in Tabelle 2-4 orientiert sich am Mindestquerschnitt $b / h = 60 \text{ mm} / 120 \text{ mm}$ sowie an lieferbaren Querschnittswerten. Ein projektbezogener Nachweis in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen (Eigengewicht der Fassadenelemente, Ständerabstand e , Materialfestigkeit etc.) ist weiterhin unumgänglich. Aufgrund der Überschneidung der erforderlichen Querschnittswerte aus horizontaler Belastung (vgl. Tabelle 2-3) wurde im Bereich einer Bezugshöhe von $15 \text{ m} \leq z \leq 11 \text{ m}$ der Einfluss der Windzone WZ in Kombination mit einer Lage innerhalb eines Mischprofils der Geländekategorie I und II mit einbezogen.

Tabelle 2-4: Empfohlener Ständerquerschnitt in Abhängigkeit der Bezugshöhe z sowie der Windzone WZ im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante (Eigene Darstellung)

Windzone	Bezugshöhe	Gebäudeklasse	Erforderlicher Querschnitt der Ständer
WZ 1 – 4	$z \leq 24 \text{ m}$	GK 5	60 x 200 mm ²
WZ 1 – 4	$z \leq 17 \text{ m}$	GK 5	60 x 140 mm ²
WZ 1 – 3 WZ 4	$z \leq 15 \text{ m}$	GK 5	60 x 120 mm ² 60 x 140 mm²
WZ 1 – 4	$z \leq 11 \text{ m}$	GK 4	60 x 120 mm²
Anmerkung: Diese Orientierungswerte ersetzen nicht die für die Durchführung von Bauvorhaben gesetzlich vorgeschriebenen Genehmigungen, Zustimmungen und Bescheinigungen.			

2.2.5 Beton

Der am häufigsten verwendete Baustoff in Deutschland ist Beton. Anhand der Daten der Deutschen Zementindustrie wird dies in Abbildung 2-18 und Abbildung 2-19 verdeutlicht. Hierin sind Wohn- und Verwaltungsgebäude anhand ihrer Gründung, Wände und Decken ausgewertet.

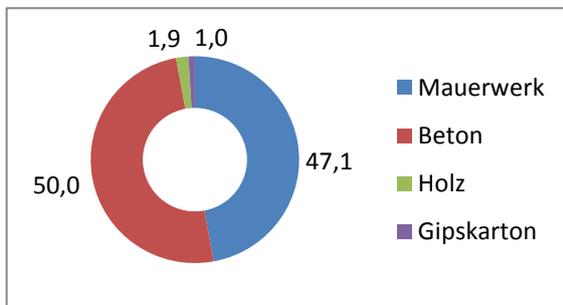


Abbildung 2-18: Baustoffanteile in % bei Eigenheimen in Deutschland (VDZ, 2009)

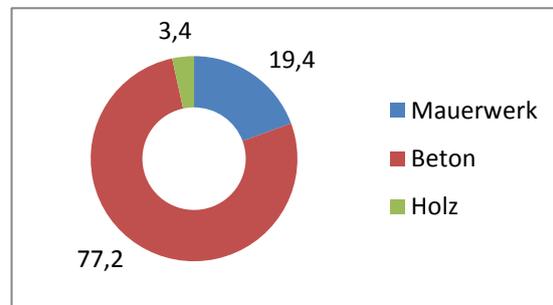


Abbildung 2-19: Baustoffanteile in % bei Verwaltungsbauten in Deutschland (VDZ, 2008a)

Beton ist nahezu überall verfügbar und kann auch durch kleinere Baufirmen verarbeitet werden. Darüber hinaus kann Beton bei einer Vielzahl an Formen und Querschnitten angewendet werden. Maßgebendes Kriterium ist häufig die Herstellung einer entsprechenden Schalung sowie die Einbaubarkeit der Betonstahlbewehrung. Moderne Verfahren zur Herstellung einer geometrisch komplizierten Schalung mittels einer CNC-Fräse, welche räumlich Formen herstellen kann, eröffnen völlig neue Möglichkeiten beim Stahlbetonbau.

2.2.5.1 Betonzusammensetzung

Beton besteht hauptsächlich aus Wasser, Zuschlag und Zement. Zusatzstoffe und Zusatzmittel werden während des Mischvorgangs in kleinen Dosierungen beigemischt, die die Eigenschaften maßgeblich beeinflussen. Beispielsweise kann durch einen Luftporenbildner die Widerstandsfähigkeit gegen Frost-Tauwechsel beeinflusst werden. Als sechster Bestandteil von Beton wird auch Luft genannt, die in den Poren des Betons eingeschlossen ist.

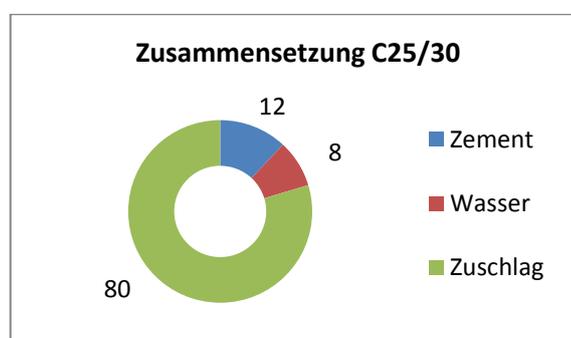


Abbildung 2-20: Zusammensetzung eines Betons C25/30 in % (Beton, 2011)

Je nach Betonrezeptur können verschiedene Festigkeiten erreicht werden. Die verschiedenen Betonsorten werden wie folgt benannt: Beispielsweise ist ein C25/30 ein Beton (engl. Concrete) mit einer Zylinder-

druckfestigkeit von 25 N/mm² und einer Würfeldruckfestigkeit von 30 N/mm². Die Zylinder- und Würfeldruckfestigkeiten werden anhand von Druckversuchen durch Probekörper mit genormten Abmessungen ermittelt. Diese Vorgaben sind in der DIN EN 12390 angegeben. (DIN EN 12390, 2009) Die normal festen Betone sind in einem Bereich von C8/10 bis C50/60 angesiedelt. Ab der Betongüte C55/67 spricht man von hochfesten Betonen.

Die gebräuchlichsten Betonfestigkeiten liegen im Bereich der Sorten C20/25 bis C35/45. Je höher die Betonfestigkeit ist, desto mehr Zementgehalt ist im Beton vorhanden. Bei der Herstellung von Zement bzw. beim Brennvorgang der Ausgangsstoffe Kalkstein, Ton und Mergel ist viel Energie notwendig um die erforderliche Brenntemperatur von ca. 1450 °C zu erreichen. Deswegen weist Beton eine ungenügende Ökobilanz auf. (siehe Abbildung 2-21)

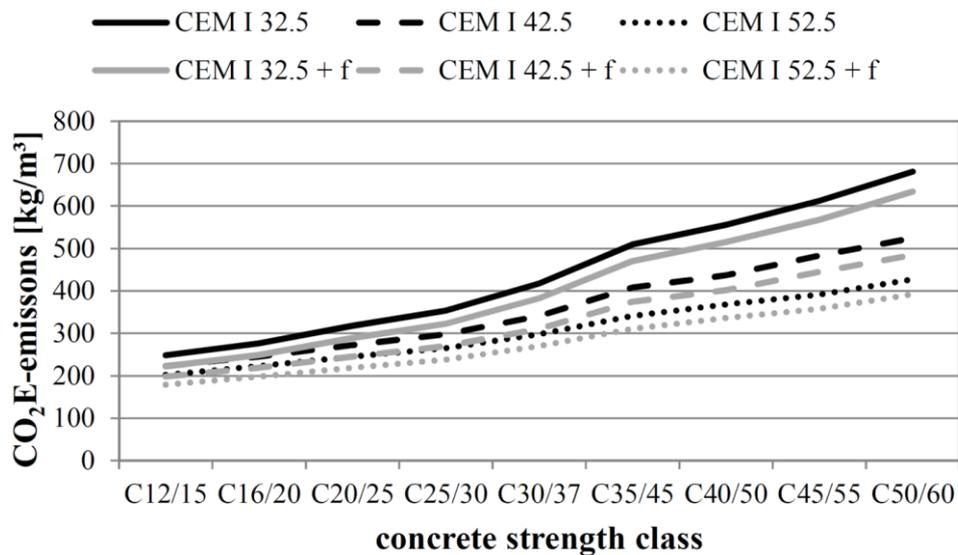


Abbildung 2-21: Zusammenhang der Betonfestigkeitsklasse mit der CO₂-Emission bei der Herstellung (Fischer, 2013, S. 883-884)

Jedoch zeigt sich auch in Abbildung 2-21 qualitativ, dass durch das Betonrezept CO₂ eingespart werden kann. Die positive Beeinflussung der Ökobilanz gelingt zum einen durch die Wahl einer höheren Zementgüte und zum anderen durch den Einsatz von Flugasche (+f). Infolge einer höheren Zementgüte und somit auch einer höheren Betongüte können schlankere Bauteile realisiert werden, wodurch in der Summe Baustoffe eingespart werden und bei gleichem umbauten Raum mehr nutzbare Raumfläche geschaffen wird. Weiterhin wird die Ökobilanz auch vom Stahlanteil beeinflusst.

2.2.5.2 Eigenschaften von Beton

Beton zeichnet sich im Wesentlichen durch seine hervorragende Druckfestigkeit aus. Da Beton jedoch besonders unter Zugbeanspruchung sehr spröde reagiert, wird dieses Verhalten durch den Einsatz der Betonstahlbewehrung kompensiert. Somit sind auch schlanke Biegebauteile wie Decken und Balken problemlos umsetzbar. Zu erwähnen ist jedoch, dass eine Rissbildung bei Betonbauteilen nahezu unumgänglich ist.

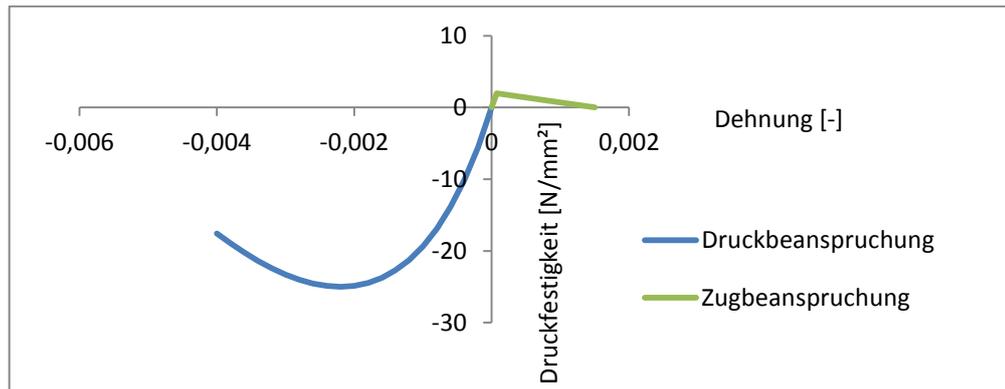


Abbildung 2-22: Arbeitslinie von C25/30 nach DIN EN 1992-1-1 (Druckbeanspruchung) (DIN EN 1992-1-1, 2011) und Quast (Zugbeanspruchung) (Quast, 2010, S. 397-403)

Durch das betonspezifische Langzeitverhalten wie Kriechen und Schwinden, kommt es zu Verkürzungen in der Betonstruktur, die Risse zur Folge haben. An dieser Stelle muss auch festgehalten werden, dass erst durch die Rissbildung die normale Betonstahlbewehrung aktiviert wird. Deshalb ist beim Stahlbetonbau eine sorgfältige Wahl der Bewehrung zur Rissbreitenbeschränkung erforderlich. Durch eine geeignete Bewehrung kann ein gleichmäßiges und entsprechend feines Rissbild erreicht werden, das auch höchsten Ansprüchen genügt. Die vorhandenen Risse sind dann kaum noch wahrnehmbar.

2.2.5.3 Bemessung von Betonbauteilen

Zur Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen ist in Deutschland die DIN EN 1992-1-1 (DIN EN 1992-1-1, 2011) mit dem nationalen Anhang DIN EN 1992-1-1/NA (DIN EN 1992-1-1/NA, 2013) bauaufsichtlich eingeführt.

Grundlagen Tragwerksplanung

Zunächst müssen jedoch die Bemessungsschnittgrößen ermittelt werden. Dazu gibt die DIN EN 1992-1-1 Teilsicherheitsbeiwerte auf Einwirkungs- und Materialseite sowie Kombinationsbeiwerte vor. Mit den Kombinationsbeiwerten können die verschiedenen Lastfallkombinationen ermittelt werden. Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} ermittelt man wie folgt:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_M} \quad (2-9)$$

mit:

f_{ck}	Zylinderdruckfestigkeit des Betons
α_{cc}	Dauerstandsbeiwert des Betons zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen
α_{cc}	= 0,85

Als Eingangswert für die Bemessungshilfen sind das maßgebende Biegemoment, die Querschnittsabmessungen und Baustoffeigenschaften erforderlich. Ermittelt wird die erforderliche Bewehrungsmenge um das Gleichgewicht zwischen inneren Kräften infolge der Einwirkungen und des Widerstands gemäß Abbildung 2-24 herzustellen.

Dauerhaftigkeit und Betondeckung

Die Dauerhaftigkeit spielt bei Tragwerken eine zentrale Rolle, da diese während der vorgesehenen Nutzungszeit gewährleistet werden muss. Bei Stahlbetontragwerken wird die Dauerhaftigkeit zunächst durch die zu wählende Expositions-klasse des jeweiligen Bauteils berücksichtigt. Dabei wird zwischen Beton- und Bewehrungskorrosion unterschieden. Die einzelnen Expositions-klassen sind noch in Untergruppen untergliedert, um den jeweiligen Einflussparameter genauer erfassen zu können. Mit der Wahl der erforderlichen Expositions-klasse gibt die DIN EN 1992-1-1 die erforderliche Betondeckung und Betongüte vor.

Tabelle 2-5: Normenformulierung / Expositions-klassen (DIN EN 1992-1-1, 2011, S.16)

X0	Kein korrosions- oder Angriffsrisiko
Bewehrungskorrosion	
XC	Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Karbonatisierung
XD	Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Chloride (ausgenommen Meerwasser)
XS	Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser
Betonkorrosion	
XF	Frostangriff mit und ohne Taumittel
XA	Betonangriff durch chemischen Angriff
XM	Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung
WO, WF, WA, WS	Betonkorrosion durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Mit der folgenden Abbildung werden die zu wählenden Expositions-klassen anhand von einem Beispiel veranschaulicht.

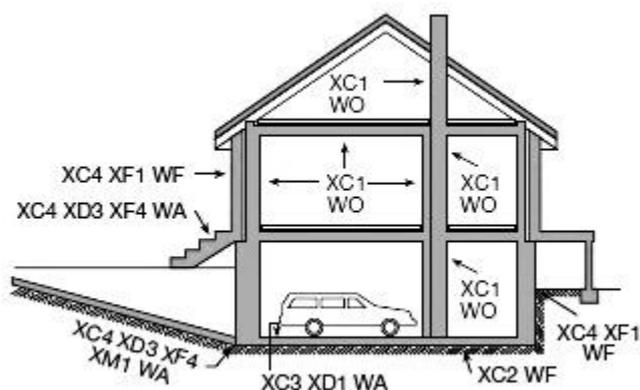


Abbildung 2-23: Expositions-klassen am Beispiel eines Einfamilienhauses (Oesterheld, 2014)

Nachweise im GZT

Bei der Biegebemessung mit/ohne Normalkraft von Stahlbetonbauteilen geht man immer von einem gerissenen Querschnitt aus. Die vorhandenen Zugspannungen infolge der Belastung übersteigen die aufnehmbare Zugfestigkeit des Betons. Zum einen ist eine Betondruckzone vorhanden und zum anderen wird der Bewehrungsstahl auf Zug beansprucht. Die DIN EN 1992-1-1 gibt genaue Grenzen bezüglich der zulässigen

gen Stauchung des Betons bzw. Dehnung des Stahls vor. Innerhalb dieser Grenzen muss der Nachweis geführt werden. Diese Grenzen sind schematisch als Abbildung der Dehnungsebenen in der Norm festgehalten. Eine grafische Auswertung ist mit dem allgemeinen Bemessungsdiagramm bzw. als Tabellenauswertung mit der Tabelle der dimensionslosen Beiwerte als Bemessungshilfe erstellt.

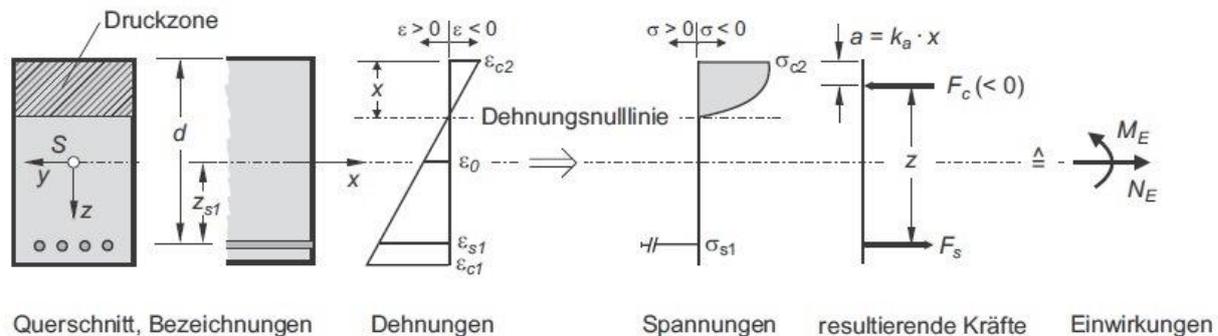


Abbildung 2-24: Dehnungen, Spannungen und resultierende Kräfte eines Biegebalkens im gerissenen Zustand II (Zilch, 2010, S. 195)

Die Querkrafttragfähigkeit gilt als erfüllt, sofern folgendes Kriterium nachgewiesen werden kann.

$$V_{ed} \leq V_{Rd,c} \quad (2-10)$$

mit:

V_{ed} Bemessungswert der Querkraft im untersuchten Querschnitt aus äußerer Einwirkung
 $V_{Rd,c}$ Querkraftwiderstand eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung

Bei Einhaltung des Kriteriums ist keine planmäßige Schubbewehrung erforderlich. Falls die obere Gleichung nicht erfüllt ist, wird auf DN EN 1992-1-1, Kapitel 6.2.3 verwiesen. Bei balkenartigen Trägern ist immer eine Mindestschubbewehrung anzuordnen.

Beschränkung der Rissbreite und Mindestbewehrung

Stahlbeton ist ein Verbundwerkstoff bestehend aus Stahl und Beton. Der Bewehrungsstahl kann, bei auf Biegung beanspruchten Bauteilen, erst komplett aktiviert werden, sobald der umliegende Beton auf Zug versagt. Die Rissbildung ist folglich nahezu unumgänglich. Jedoch kann die Breite der Risse und das Rissbild durch eine entsprechende Bewehrung begrenzt werden. Die Rissbreitenbeschränkung ist in Bezug auf die Dauerhaftigkeit und gegebenenfalls Wasserundurchlässigkeit von Betonteile von großer Bedeutung. Die Grundlage ist eine anzustrebende mittlere Rissweite w_k . Diese ist durch die DIN EN 1992-1-1 entsprechend der erforderlichen Expositionsklasse anzusetzen. Weiterhin gibt die DIN EN 1992-1-1 mehrere Möglichkeiten vor, den Nachweis zur Begrenzung der Rissweiten zu erfüllen. Diese sind unter Kapitel 7.3.2 bis 7.3.4 der Norm enthalten.

Begrenzung der Verformung

Das Stahlbetontragwerk bildet bei der untersuchten Hybridbauweise die tragende und aussteifende Struktur des Gebäudes. Weitere Elemente, u.a. Fassaden werden an das Tragwerk montiert. Daher ist es wichtig, dass die Verformungen des Stahlbetontragwerks derart beschränkt werden, dass auch im Endzustand keine Zwängungen auf sekundäre Tragelemente entstehen. Ist man auf genaue Werte angewiesen, ist der Nachweis der Begrenzung der Verformung mit direkter Berechnung zu empfehlen. Hier ist das Verfahren nach DIN EN 1992-1-1 (DIN EN 1992-1-1, 2011) zu nennen, welches Einflüsse infolge Rissbildung berücksichtigt und folglich reale Werte liefert. Weitere Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Verformungen von Stahlbetontragwerken im Zustand II finden sich im Heft 600 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) (DAfStb-Heft 600, 2012) oder in ausgewählten Artikeln der Fachliteratur. Durch die Methode ohne direkte Berechnung anhand der Biegeschlankheiten erhält man keinen genauen Wert der Verformung. Der Nachweis beim Biegeschlankheitskriterium erfolgt über einen Vergleich der Biegeschlankheit (Spannweite / statischen Nutzhöhe = l / d) gegenüber dem errechneten Wert.

Herstellung/ Betonage

Angaben zur Herstellung und Eigenschaften des Frischbetons sind in DIN EN 206 (DIN EN 206, 2014) angegeben. Darin sind auch die Anforderungen des Betons festgelegt, welche für die Ortbeton- und Fertigteilbauweise erforderlich sind. Neben der Planung sind auch die Betonage und die Nachbehandlung sehr wichtig zur Sicherung der Betonqualität in Bezug auf Festigkeit und Aussehen. In DIN EN 13670 (DIN EN 13670, 2011) sind zu sämtlichen Herstellungsschritten die Vorgaben enthalten. Zur Vermeidung von Kiestern muss der Beton beim Einbringen ausreichend verdichtet werden. Des Weiteren ist anzumerken, dass bei der Nachbehandlung der Beton in einem feuchten Milieu bleiben soll. Der Zementstein im Beton erlangt seine Festigkeit durch Hydratation, also durch die Reaktion mit Wasser. Die erforderlichen Ausschalfristen sind zu beachten. Angaben zu den Ausschalfristen sind in DIN EN 13670 nicht enthalten. Daher werden die Angaben von DIN 1045: 1988 als Anhaltswerte empfohlen. Des Weiteren wurde vom Deutschen Betonverein das Merkblatt „Betonschalungen und Ausschalfristen“ (Fingerloos, 2006) erstellt, in welchem die Thematik näher erörtert wird.

Tabelle 2-6: Ausschalfristen nach DIN 1045:1988 (DIN 1045, 1988)

Festigkeitsklasse des Zements	Für die seitliche Schalung der Balken und die Schalung der Wände und Stützen [Tage]	Für die Schalung der Deckenplatten [Tage]	Für die Rüstung (Stützung) der Balken Rahmen und weit gespannter Platten [Tage]
42,5R, 52,5N, 52,5R	1	3	6
32,5R, 42,5N	2	5	10
32,5 N	3	8	20

2.2.5.4 Grundprinzipien der Befestigung der Holzfassadenelemente

Die Holzfassadenelemente werden an das Stahlbetontragwerk befestigt. Verschiedene Varianten sind für den Anschluss möglich. Abbildung 2-25 zeigt vereinfacht drei Anschlussvarianten: „vorgestellt“, „vorgehängt“ und „eingestellt“. Dabei wird zwischen einer Lage in einer äußeren oder in einer inneren Ebene im Verhältnis zum massiven Tragwerk unterschieden. Diese Ebenen wirken sich unterschiedlich auf bauphysikalische Eigenschaften im Anschlussbereich (vgl. Kapitel 2.4) sowie die Belastung der Befestigungswinkel (vgl. Kapitel 5.1.2) aus.

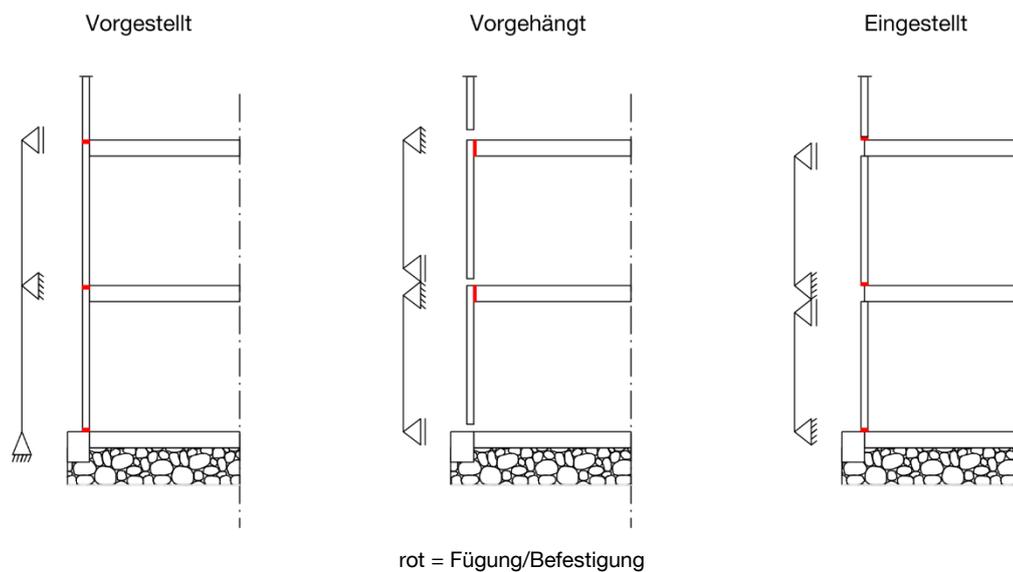


Abbildung 2-25: Anschlussvarianten nichttragender Fassadenelemente (Eigene Darstellung)

Die Anschlussvarianten aus Abbildung 2-25 unterscheiden sich in ihrer Lage sowie ihrer Lastweiterleitung. Bei der vorgestellten Variante befindet sich die nichttragende Außenfassade vor dem Tragwerk. Die Eigenlast wird über die einzelnen Fassadenelemente nach unten hinweg weitergeleitet oder geschossweise über eine Verbindung in die untere massive Decke eingeleitet. Stellen die Fassadenelemente ein gänzlich sich selbst tragendes Bauteil dar, so werden die vertikalen Eigenlasten über die einzelnen Elemente hinweg nach unten in die Konstruktion oder ein eigenes Fundament weitergeleitet. Bei der vorgehängten Variante befinden sich die Fassadenelemente ebenfalls außerhalb des Tragwerks, werden jedoch geschossweise an die oberen massiven Decken angehängt. Die eingestellte Variante ist dadurch gekennzeichnet, dass die Außenfassadenelemente geschossweise direkt auf den massiven Decken des Tragwerks stehen und somit in einer Ebene innerhalb des Tragwerks liegen.

Zur Einhaltung von bauphysikalischen Kenngrößen des Wärmeschutzes oder des Schallschutzes werden die Elemente mit einem definierten Einstellgrad auf den Deckenrändern der Tragstruktur gelagert, wobei gleichzeitig die Standsicherheit der Fassadenelemente gewährleistet sein muss. In allen Varianten werden horizontal gerichtete Windlasten in Form von Druck bzw. Zugkräften geschossweise in die massiven Decken weitergeleitet.

Nachfolgende Tabelle fasst die Vor – sowie Nachteile der einzelnen Anschlussvarianten im Überblick zusammen.

Tabelle 2-7: Überblick Anschlussvarianten (Eigene Darstellung)

	Vorgestellte Anschlussvariante	Vorgehängte Anschlussvariante	Eingestellte Anschlussvariante
System	Eigenständiges System in einer äußeren Ebene außerhalb des Tragwerks	Eigenständiges System in einer äußeren Ebene außerhalb des Tragwerks	Einfeld-System innerhalb des Tragwerks je Geschoss
Vorteile	<p>Ausgleich größerer Toleranzen gegenüber Maßabweichungen</p> <p>Durchgehende annähernd wärmebrückenfreie Dämmhülle</p> <p>Problemlose Führung der luftdichten, dampfbremsenden Schicht</p>	<p>Höhere Knickstabilität</p> <p>Durchgehende annähernd wärmebrückenfreie Dämmhülle</p> <p>Problemlose Führung der luftdichten, dampfbremsenden Schicht</p>	<p>Möglichkeit der Integrierung des Skelettbaus innerhalb der Fassade</p> <p>Günstige Schall-Nebenwegübertragung</p> <p>Trennung von Brandausbreitungswege mithilfe des massiven Tragwerks</p>
Nachteile	<p>Erhöhter Ausführungsaufwand in Bezug auf Einhaltung von Schallschutz und Brandschutz</p>	<p>Bezug auf Einhaltung von Schall- und Brandschutz</p> <p>Konzipierung aufwendigerer Anschlüsse</p>	<p>Setzungempfindliches System</p> <p>Größere Fugen zum massiven Tragwerk aus Montagegründen</p> <p>Erhöhte Wärmebrückengefahr</p> <p>Problemhafte Führung der luftdichten, dampfbremsenden Schicht</p>

2.3 Grundlagen Bauphysik

Holz und Stahlbeton besitzen unterschiedliche stoffliche und bauphysikalische Eigenschaften. Neben Informationen zu den wichtigsten Themengebieten in der Bauphysik werden in den folgenden Abschnitten die Eigenschaften der Baumaterialien gegenübergestellt und ihre funktionalen Ergänzungsmöglichkeiten aufgezeigt. Tabelle 2-8 stellt die mechanischen, bauphysikalischen und allgemeinen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen denen des Stahlbetons gegenüber. Es wird ersichtlich, dass sich die aus Stahlbeton bestehende Tragkonstruktion optimal mit den Holzfassadenelementen ergänzen kann.

Tabelle 2-8: Gegenüberstellung der Baustoffe mit ihren wesentlichen Eigenschaften für die Verwendung im Mischbau (Holzbau handbuch R01 T01 F05, 2006, S. 20)

Baustoffe	Mechanische Eigenschaften und Festigkeitsverhalten	Bauphysikalische Eigenschaften	Allgemeine Eigenschaften sowie im Hinblick auf die Bauweise
Holz/ Holzwerkstoffe (HWS)	<p>Günstiges Verhältnis von Gewicht und Festigkeit</p> <p>HWS mit vergüteten, homogenen Eigenschaften</p> <p>Geringes E-Modul ergibt vergleichsweise kleine wirtschaftlichen Spannweiten</p> <p>Leicht zu bearbeiten, geringes Eigengewicht</p> <p>Berechenbares Quellen und Schwinden der Einzelbauteile aus Vollholz</p>	<p>Geringe Wärmeleitfähigkeit</p> <p>Massivholzprodukte mit hoher Speicherkapazität</p> <p>brennbar</p>	<p>Nachhaltiger Baustoff mit sehr guter Ökobilanz</p> <p>Maßtoleranzen im Millimeterbereich</p> <p>Standardisierte Detaillösungen</p> <p>Vielfältige Möglichkeiten auch bei dreidimensionaler Formgebung</p> <p>Durch geringes Eigengewicht Bauteile leicht zu verarbeiten</p> <p>Austausch im verbauten Zustand leicht möglich</p> <p>Verbindungsmittel zum Fügen notwendig</p> <p>Industrielle Fertigung und breite, vielseitige Produktpalette</p>
Stahlbeton	<p>Geeignet zur Aufnahme hoher Druckspannungen mit geringen Verformungen</p> <p>Hohes Eigengewicht</p> <p>Hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Abnutzung durch geeignete Zusatzstoffe</p> <p>Relativ geringe Zugfestigkeit</p> <p>Bei großen Querschnitten entsprechendes Schwinden während des Abbindens</p>	<p>Sehr gute Schalldämmung und hohe Speicherkapazität durch große Masse</p> <p>Schlechte Wärmedämmeigenschaften</p> <p>Nicht brennbar</p>	<p>Standardisierte Detaillösungen</p> <p>Vielfältige Möglichkeiten auch bei dreidimensionaler Formgebung</p> <p>Energieaufwendiger Herstellungsprozess des Ausgangsmaterials Zement</p> <p>Durch hohes Eigengewicht fertige Bauteile nur aufwändig zu manipulieren</p> <p>Austausch im verbauten Zustand sehr aufwendig</p> <p>Variation der Produktpalette gering</p>

Ein positiver Effekt des Holzbaus ist es, dass Holz durch seine Materialstruktur bereits von Natur aus ein guter Dämmstoff ist. Deshalb werden im Holzsystembau - im Vergleich zum Massivbau - bei optimalem Schichtenaufbau platzsparend gute Dämmwerte erreicht und es entstehen geringere Transmissionswärmeverluste (vgl. Abbildung 2-52, S.85). In der Gesamtbilanz können im Winter die schlechten Wärmedämmeigenschaften des Betons durch jene der Holzfassade kompensiert werden. Im Sommer hingegen kann die hohe Speicherkapazität des Massivbaus durch die Fähigkeit der Phasenverschiebung der max. Tagestemperatur in die Nacht hinein (siehe Kapitel 2.4.3) eine Überhitzung des Rauminnen eindämmen.

Bei der Ausbildung des Schallschutzes erscheint der Massivbau zunächst günstiger. Aber auch bei entsprechend konzipierten Holzbauteilen können die Werte des erhöhten Schallschutzes nach VDI 4100 (VDI 4100, 2012) erreicht werden. Nähere Ausführungen zum Schallschutz können Kapitel 2.9 und 5.4 entnommen werden.

Die zur Bewertung und Berechnung von bauphysikalischen Eigenschaften erforderlichen Kennwerte können Tabelle 2-9 entnommen werden.

Tabelle 2-9: Bauphysikalische Größen, Formelzeichen, Einheiten (Willems, 2010, S. 10.2 und 10.30)

Wärmeschutztechnische Größe	Formelzeichen	Einheit
Luftfeuchte, relative	ϕ	%
Luftschichtdicke, wasserdampfdiffusionsäquivalente	s_d	m
Lufttemperatur (außen)	θ_e	°C
Lufttemperatur (innen)	θ_i	°C
Masse, flächenbezogene	m'	kg/m ²
Oberflächentemperatur (außen)	θ_{se}	°C
Oberflächentemperatur (innen)	θ_{si}	°C
Rohdichte	ρ	kg/m ³
Schichtdicke	d	m
Speicherfähigkeit, wirksame	C_{wirk}	W·h/K
Speicherfähigkeit, spezifische	c	Ws/(kg·K)
Taupunkttemperatur	θ_s	°C
Tauwassermasse, flächenbezogene	$m_{w,T}$	kg/(m ² ·a)
Temperatur, thermodynamische (absolute)	T	K
Temperaturfaktor	f_{Rsi}	-
Wärmedurchgangskoeffizient	U	W/(m ² ·K)
Wärmedurchgangskoeffizient, Korrekturwert	ΔU	W/(m ² ·K)
Wärmedurchgangskoeffizient, längenbezogener	ψ	W/(m·K)
Wärmedurchgangskoeffizient, punktbezogener	χ	W/K
Wärmedurchgangswiderstand, mehrschichtiger Bauteile	R_T	m ² K/W
Wärmeleitfähigkeit	λ	W/(m·K)
Wärmemenge	Q	Ws
Wärmestrom	Φ	W
Wärmestromdichte	q	W/m ²
Wärmeübergangswiderstand (außen)	R_{se}	m ² K/W
Wärmeübergangswiderstand (innen)	R_{si}	m ² K/W
Wasseraufnahmekoeffizient	w	kg/(m ² ·h ^{0,5})
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	μ	-
Wasserdampfkonzentration	c_D	g/m ³
Wasserdampfsättigungskonzentration	c_s	g/m ³
Wasserdampfpartialdruck	p_D	Pa
Wasserdampfsättigungsdruck	p_s	Pa

2.4 Wärmeschutz

2.4.1 Allgemeines

Ein optimaler Wärme- und Feuchteschutz fördert nicht nur die Gesundheit des Nutzers und ein hygienisches Raumklima, sondern senkt vor allem den Heiz- und Kühlenergieverbrauch sowie das Bauschadensrisiko durch Feuchteinwirkungen. Demnach ist sicherzustellen, dass die Wärmeverluste eines Raumes im Winter und der Wärmeeintrag im Sommer gering gehalten werden. Des Weiteren sollten Tauwasserausfälle an kalten Wand- und Fensteroberflächen, in Eckbereichen und innerhalb der Bauteile vermieden werden.

Die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz werden in der DIN 4108-2 (DIN 4108-2, 2013) geregelt. Diese definiert den Mindestwärmeschutz im Winter über die Wärmedämmung und Wärmebrücken in der wärmeübertragenden Umfassungsfläche, den Hitzeschutz im Sommer sowie die Anforderungen an die Luftdichtheit von Außenbauteilen.

Als Folge der europäischen Harmonisierung wird die Anforderung an die Energieeinsparung allerdings seit 2002 über das „Energieeinsparungsgesetz“ (EEG, 2005) und die „Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energieeinsparende Anlagentechnik bei Gebäuden“ (EnEV, 2007) definiert und vorgegeben. Die aktuelle Fassung – EnEV 2014 – wurde im November 2013 bekannt gegeben und trat 2014 in Kraft. Inbegriffen ist eine Erhöhung der Anforderungen ab dem 01.01.2016. Die neue EnEV soll voraussichtlich 2018 erscheinen. Mit Hilfe des EEG und der EnEV werden die Richtlinien des Europäischen Parlaments und Rates umgesetzt. Weitere Informationen zur Energieeffizienz von Gebäuden können Kapitel 2.11 entnommen werden.

2.4.2 Winterlicher Wärmeschutz

Durch das winterliche Temperaturgefälle von innen nach außen wird Wärme durch die Hüllflächen eines Gebäudes transportiert (Transportmechanismen: Wärmeleitung, -strömung und Strahlung; siehe Abbildung 2-26). Demnach ist der Wärmeverlust über opake Bauteile vom Wärmedurchlasswiderstand R bzw. dem Wärmedurchgangskoeffizienten U des Bauteils, der Anordnung der einzelnen Schichten bei mehrschichtigen Bauteilen, dem erhöhten Wärmestrom im Bereich von Wärmebrücken und der Luftdichtheit der Bauteile bzw. deren Anschlüsse abhängig.



Abbildung 2-26: Arten des Wärmetransports (Schopbach, 2014, S. 143)

Der Heizenergiebedarf durch Transmissionswärmeverlust wird nach DIN V 18599-2, Abschnitt 6.2.1 (DIN V 18599-2, 2011) folgt bilanziert:

$$a) \quad H_{T,D} = \Sigma(U_j \cdot A_j) + \Delta U_{WB} \cdot \Sigma A_j [W/K] \quad (2-11)$$

(mit pauschalem Wärmebrückenzuschlag) bzw.

$$b) \quad H_{T,D} = \Sigma(U_j \cdot A_j) + \Sigma[l_j \cdot \psi_j] [W/K] \quad (2-12)$$

(mit längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten)

In Abbildung 2-27 ist ein Geschossdeckenstoß mit Fensteranschluss dargestellt. Die normativen Randbedingungen, wie z.B. die Maßbezüge können der DIN 4108 Beiblatt 2, Tabelle 7 (DIN 4108 Bbl. 2, 2006) entnommen werden. Die Ermittlung der maßgebenden Parameter wird im Folgenden näher erörtert.

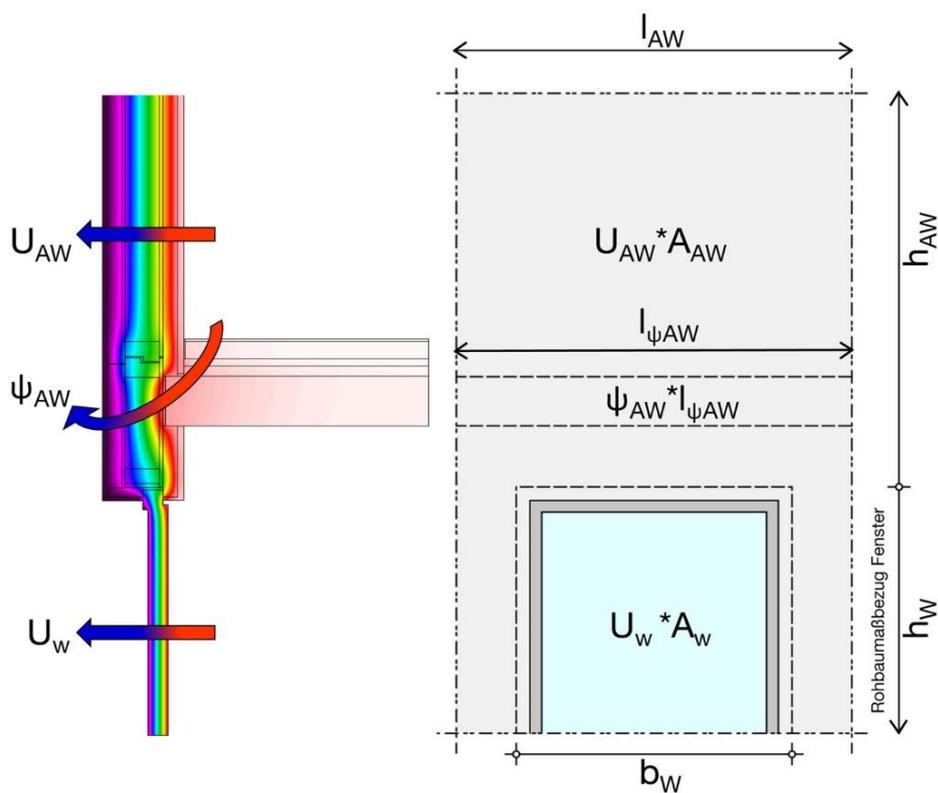


Abbildung 2-27: Geschossdeckenstoß und Fensteranschluss mit Darstellung der Wärmedurchgangs- und Wärmebrückenkoeffizienten inkl. der Maßbezüge nach DIN 4108 Beiblatt 2 (Eigene Darstellung)

Wärmedurchlasswiderstand R und Wärmedurchgangskoeffizient U

Der Wärmedurchgangskoeffizient U – Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes R – eines Bauteils errechnet sich mit

$$U = \frac{1}{R_T} + \Delta U \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (2-13)$$

mit $R_T = R_{si} + R + R_{se}$ (homogene Schichten)

mit:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (2-14)$$

$R_T = (R'_T + R''_T)/2$ und

$\Delta U = \Delta U_g + \Delta U_f + \Delta U_r$

mit:

R_T Wärmedurchgangswiderstand eines Bauteils als Summe aus den Wärmedurchgangswiderständen R_i der einzelnen Bauteilschichten i und den Wärmeübergangswiderständen nach innen R_{si} und außen R_{se} in $\text{m}^2\text{K/W}$ (siehe auch Anhang 2)

d Schichtdicke in m

λ Wärmeleitfähigkeit der Schicht in W/mK

ΔU_g Korrekturwert bei Luftspalten im Bauteil in $\text{W/m}^2\text{K}$

ΔU_f Korrekturwert bei Dämmschichten durchdringenden Befestigungselementen in $\text{W/m}^2\text{K}$

ΔU_r Korrekturwert bei Niederschlag auf Umkehrdächer in $\text{W/m}^2\text{K}$

Wie in Kapitel 2.4.1 bereits erwähnt, diktiert die DIN 4108-2 die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Dabei wird zwischen einer schweren und leichten Bauweise unterschieden, die nach der flächenbezogenen Masse des Bauteils definiert ist.

Bei der Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes R werden nur die raumseitigen Schichten bis zur Bauwerksabdichtung bzw. Dachabdichtung berücksichtigt. (DIN 4108-2, 2013, Abschnitt 5.2.2) Vor allem bei einer hinter- oder unterlüfteten Fassade muss darauf geachtet werden.

Als Grundlage für die wärmeschutztechnischen Betrachtungen fungieren das EEG und die EnEV. Bei Wohngebäuden sind nach EnEV 2014 Höchstwerte für den Jahresprimärenergiebedarf und für den spezifischen Transmissionswärmeverlust vorgeschrieben. Als Richtwert für den Wärmedurchgangskoeffizienten je Bauteil kann das Referenzgebäude nach Anlage 1, Tabelle 1, EnEV 2014 (siehe Tabelle 2-10) herangezogen werden.

Tabelle 2-10: Richtwerte Wärmedurchgangskoeffizienten bei Ausführung des Referenzgebäudes (Wohngebäude) nach EnEV 2014

Bauteile	Referenzausführung	
	Raum-Solltemperaturen im Heizfall $\geq 19^\circ\text{C}$	Raum-Solltemperaturen im Heizfall von 12 bis $< 19^\circ\text{C}$
Außenwand, Geschossdecke gegen Außenluft	$U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	$U = 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Wärmebrückenzuschlag	$\Delta U_{\text{WB}} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$\Delta U_{\text{WB}} = 0,10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Die pauschalen Wärmebrückenzuschläge ΔU_{WB} dürfen dann angesetzt werden, wenn die Ausführung der Bauteilanschlüsse nach DIN 4108 Beiblatt 2 erfolgt. Sie ersetzen demnach eine detaillierte und aufwendige Berechnung aller Wärmebrücken, wirken sich aber besonders bei Niedrigenergiestandards sehr ungünstig auf die Bilanzierung aus. Zudem können im reinen Holzbau meist ohne erheblichen konstruktiven Mehraufwand und bei genauem Nachweis oftmals ΔU_{WB} -Werte gleich oder nahe Null nachgewiesen werden. (Holzbau handbuch R03 T02 F07, 2008, S. 13) Nichtwohngebäude werden nach der Normenreihe DIN V 18599 bilanziert. Neben Höchstwerten für den Jahresprimärenergiebedarf gelten nach EnEV 2014, Anlage 2, Tabelle 2 folgende Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche (Tabelle 2-11).

Tabelle 2-11: Höchstwerte für Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche von Nichtwohngebäuden nach EnEV 2014

Bauteile	Anforderungsniveau	Höchstwerte der nach EnEV 2014 bestimmten Mittelwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten	
		Zonen mit Raum- Solltemperaturen im Heizfall $\geq 19^\circ\text{C}$	Zonen mit Raum- Solltemperaturen im Heizfall von 12 bis $< 19^\circ\text{C}$
Opake Außenbauteile	Für Neuvorhaben bis zum 31.12.2015	$U = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
	Für Neuvorhaben ab dem 01.01.2016	$U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	

Der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} des Referenzgebäudes für Nichtwohngebäude deckt sich mit dem für Wohngebäude. Als Wärmebrücken bezeichnet man Konstruktionsbereiche, bei welchen es vor allem in der Heizperiode zu erhöhten Wärmeabflüssen kommt. Ursache hierfür ist die geometrische Ausbildung von Bauteilübergängen (Abbildung 2-28), die unterschiedlichen Wärmedämmeigenschaften der aufeinander-treffenden Bauteilschichten (Abbildung 2-29) und die Kombination beider Wärmebrückenarten (Abbildung 2-30). Man unterscheidet zwischen zweidimensionalen (linienförmigen) und dreidimensionalen (punktförmigen) Wärmebrücken. Die Berechnungen solcher Wärmeströme – vor allem die der dreidimensionalen

Wärmebrücken – sind aufwendig und nur mit einer speziellen Software durchzuführen. Nach der DIN 4108 Beiblatt 2 besteht für übliche Verbindungsmittel – punktförmige Wärmebrücken – keine Nachweispflicht.



Abbildung 2-28: Geometriebedingte Wärmebrücke (Eigene Darstellung)

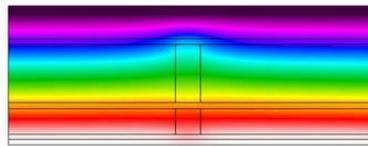


Abbildung 2-29: Materialbedingte Wärmebrücke (Eigene Darstellung)

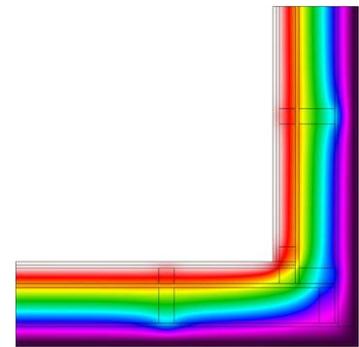


Abbildung 2-30: Überlagerung der geometrie- und materialbedingten Wärmebrückeneinflüsse (Eigene Darstellung)

Der Einfluss von Wärmebrücken ist insbesondere seit der Einführung der EnEV 2002 zu berücksichtigen. Je nach Ausführungs- und Konstruktionsart muss ein rechnerischer Anteil der Wärmebrückenverluste am Transmissionswärmeverlust H_T der wärmeübertragenden Umfassungsflächen kalkuliert und bei der Ermittlung des Jahresprimärenergiebedarfs berücksichtigt werden. Besonders bei der Hybridbauweise tritt die Problematik auf, dass Holz und Stahlbeton erheblich unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten aufweisen (Holz: $\lambda = 0,13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; Stahlbeton $\lambda = 2,50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) (Willems, 2010, Tafel 10.42). Lässt man diese unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten unberücksichtigt und kompensiert jene nicht durch geeignete Dämmmaßnahmen, kann sich der Wärmeabfluss in den Übergangsbereichen stark erhöhen. Zusätzlich sind im Übergang von Bauteilschichten eingeschlossene Luftblasen oder luftführende Gänge zu vermeiden. Jene verursachen unkontrollierte Wärmeströme oder feuchte Stellen (vgl. Kapitel 2.6 und Anhang 2, Konstruktionskatalog).

Die zweidimensionalen, längenbezogenen Wärmebrücken (vgl. Kapitel 5.3) wurden in diesem Projekt mit der Open Source Software THERM 7.3 des Lawrence Berkeley National Laboratory berechnet. Innerhalb des EnEV-Nachweises ist hierbei der außenmaßbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e auf Basis der DIN EN ISO 10211 (DIN EN ISO 10211, 2008), DIN EN ISO 13370 (DIN EN ISO 13370, 2008) und DIN EN ISO 13789 (DIN EN ISO 13789, 2008) zu ermitteln.

$$\psi_e = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right] \quad (2-15)$$

mit:

- L_{2D} thermischer Leitwert aus einer 2-D-Berechnung des die beiden betrachteten Räume trennenden Bauteils in $[\text{W}/\text{mK}]$
- U_j Wärmedurchgangskoeffizient des die beiden betrachteten Räume trennenden 1-D Bauteils j in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
- l_j Länge, für die der Wert U_j gilt

Auf die Kriterien der Modellbildung wird hier nicht näher eingegangen, sondern auf den entsprechenden Abschnitten in der Norm verwiesen.

Bei der Wärmebrückenberechnung von Holzbauteilen in THERM bestimmt man lediglich den U-Wert des Gefachs. Die KVH-Ständer, welche im Regelraster liegen, werden also in THERM nicht eingegeben. Es werden lediglich die anschlusspezifischen Hölzer mit berücksichtigt (z.B. Eckausbildung bei Wandecken).

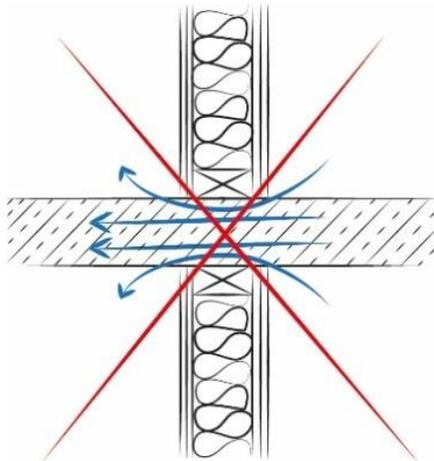
Der spezifische Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} errechnet sich nach:

$$\Delta U_{WB} = \frac{F \cdot \psi \cdot l}{A} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (2-16)$$

mit:

F	Temperaturfaktor, dimensionslos
A	Bauteilfläche in m ²
ψ	Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient in W/mK
L	Länge der Wärmebrücke in m

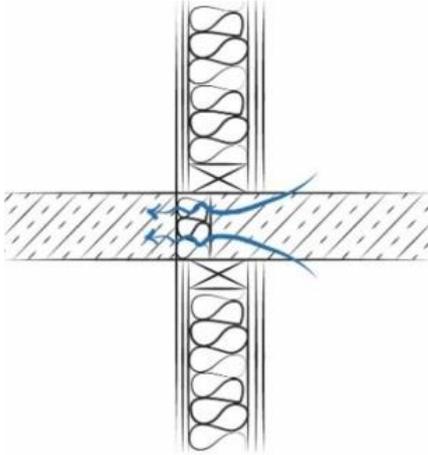
Als Planungsgrundlage in frühen Leistungsphasen können dem Konstruktionskatalog Standardanschlüsse entnommen werden. Grundlage dafür sind die Basisdetails der Referenzprojekte (siehe Kapitel 4 und 6), die von der Projektgruppe ausgewertet wurden. Zur Vermeidung von Wärmebrücken gelten im Holzbau bzw. bei Holzfassaden folgende vereinfachte Regeln (Horn, 2011, S. 62):



1. Vermeidungsregel: Die dämmende Hülle sollte nicht durchbrochen werden.

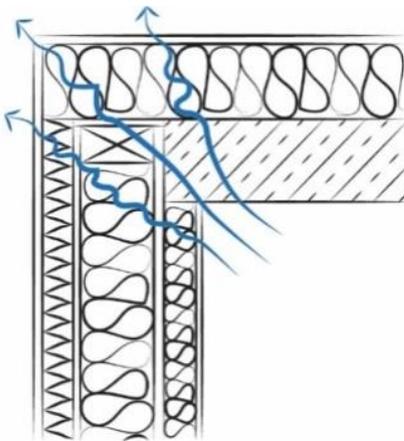
(Vorsicht auch bei hinterlüfteten Fassaden: Die Außenkante der Stb.-Decke darf nie mit der Außenkante des Holzrahmenelements abschließen, sondern muss überdämmt werden. Ansonsten entsteht eine erhebliche Wärmebrücke.)

Abbildung 2-31: Vermeidungsregel (Eigene Darstellung)



2. Durchstoßungsregel: Falls die Dämmung dennoch unterbrochen wird, dann mit möglichst hohem Wärmedurchgangswiderstand.

Abbildung 2-32: Durchstoßungsregel (Eigene Darstellung)



3. Die Dämmlagen müssen an allen Bauteilanschlüssen lückenlos ineinander übergeführt werden und nicht zuletzt muss man die Geometrie des Gebäudes berücksichtigen. Die in diesem Zusammenhang oft genannte Geometrieregeln, dass spitze Winkel gar nicht in Frage kämen, engt die Architektur unnötig ein.

Abbildung 2-33: Überlappung der Dämmlagen (Eigene Darstellung)

Weitere Konstruktionsregeln, die bei der Hybridbauweise beachtet werden sollten, können der Parameterstudie Bauphysik in Kapitel 5.3 entnommen werden.

2.4.3 Sommerlicher Wärmeschutz

Die Mindestanforderungen basieren auf dem Behaglichkeitsfeld des Menschen, welches von der Raumlufttemperatur und der mittleren Oberflächentemperatur der raumschließenden Flächen abhängig ist (Abbildung 2-34). Um die Aktivität und Leistungsfähigkeit des Menschen nicht einzuschränken, sollte die Raumlufttemperatur an heißen Sommertagen 25°C nicht überschreiten. (Energiesparmobil, o.J.)

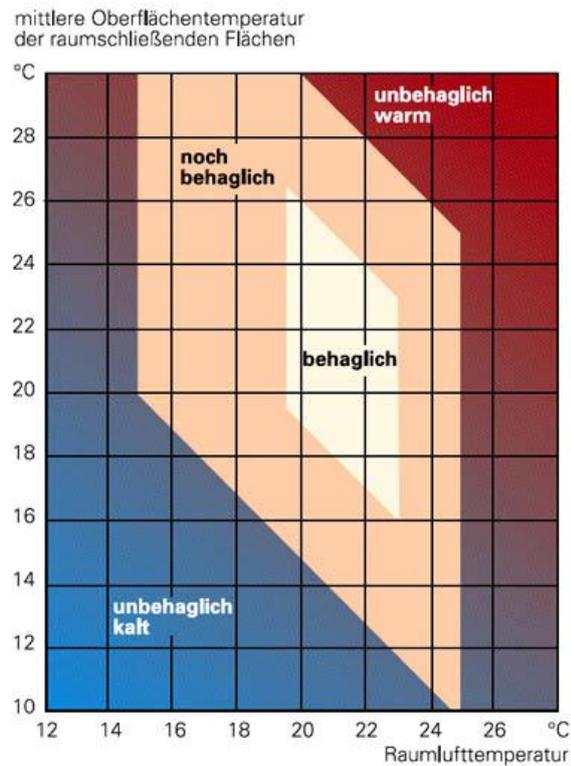


Abbildung 2-34: Raumklima und thermische Behaglichkeit aus (Frank, 1975)

Die Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und dessen Nachweis ($S_{\text{vor}} \leq S_{\text{zul}}$) werden ebenfalls über die DIN 4108-2 geregelt. Nach DIN 4108-2, Kapitel 8, Bild 1 existieren je nach Klimaregion unterschiedliche Anforderungen an den Hitzeschutz. Die Planungsfaktoren für den sommerlichen Hitzeschutz sind in Abbildung 2-35 dargestellt. Ziel ist es, einen zusätzlichen Anlageneinsatz zur Raumluftkonditionierung zu vermeiden.

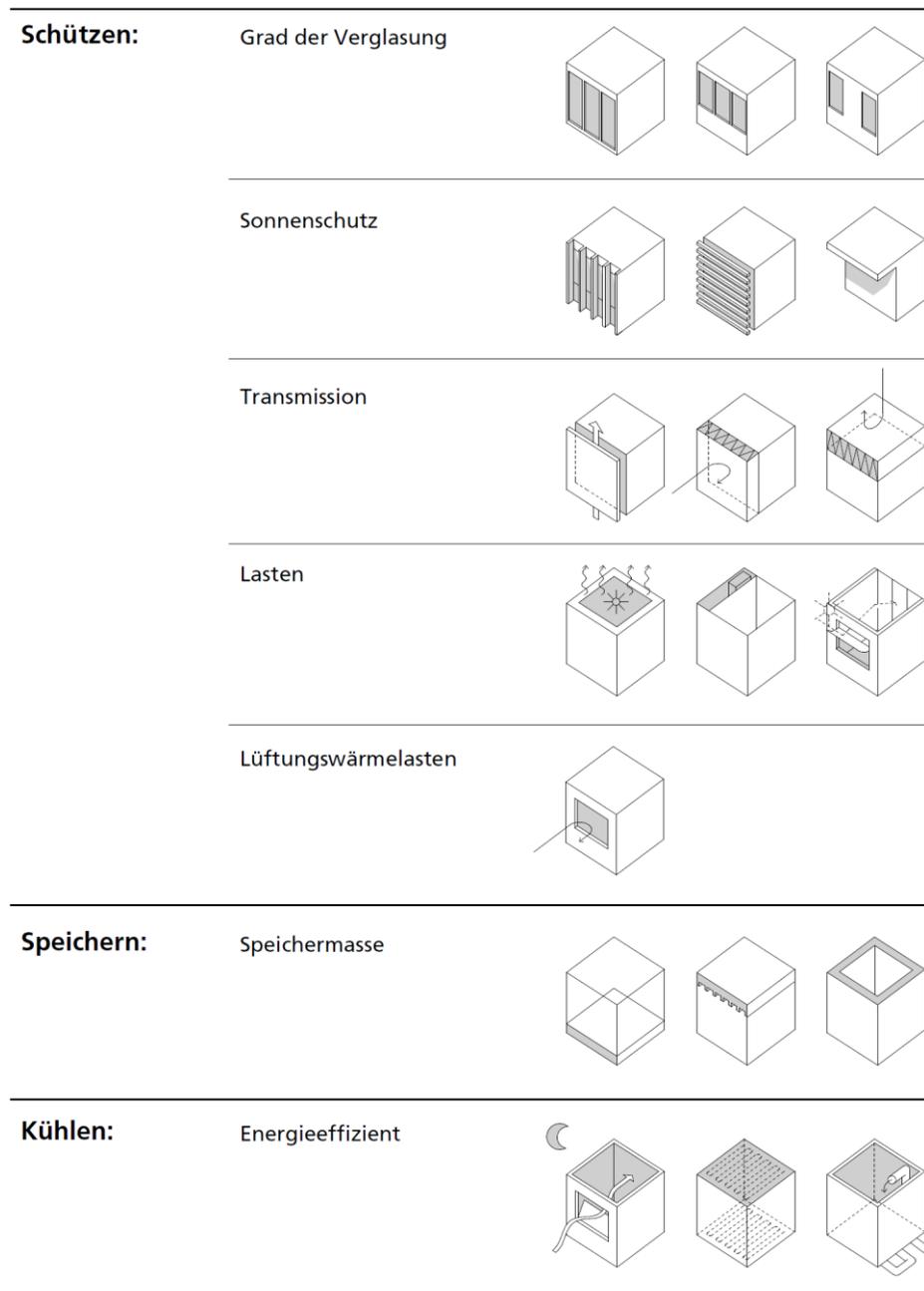


Abbildung 2-35: Planungsstrategien zum sommerlichen Wärmeschutz (holzbau handbuch R01 T02 F04, 2009, S. 24)

Der zulässige Sonneneintragskennwert S_{zul} errechnet sich folgendermaßen:

$$S_{zul} = \sum S_x = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 \quad (2-17)$$

mit:

- S_1 Kennwert, abhängig von Klimaregion, Nachtlüftung und Bauart
- S_2 Kennwert, abhängig vom grundflächenbezogenen Fensterflächenanteil f_{WG}
- S_3 Kennwert bei Einsatz von Sonnenschutzglas
- S_4 Kennwert, abhängig von der Fensterneigung
- S_5 Kennwert, abhängig von der Orientierung des Raums
- S_6 Kennwert bei Einsatz von passiver Kühlung

Diesem wird der vorhandene Sonneneintragskennwert S_{vorh} gegenübergestellt:

$$S_{\text{vorh}} = \frac{\sum_j A_{w,j} \cdot g_{\text{tot},j}}{A_G} \quad [-] \quad (2-18)$$

mit:

$A_{w,j}$ Fensterflächen des j-ten Fensters in m² nach DIN 4108-2, Bild 2

$g_{\text{tot},j} = g$ F_c Gesamtenergiedurchlassgrad mit g nach DIN EN 410 (DIN EN 410, 2011)

F_c Abminderungsfaktor für Sonnenschutzvorrichtungen nach DIN 4108-2, Tabelle 7

Die Bauart und somit die Speichermasse fließt hier lediglich durch einen Faktor in Abhängigkeit der Bauweise (leicht, mittel, schwer) ein. (siehe DIN 4108-2, Tabelle 8) Das sommerliche Wärmeschutzverhalten von opaken Bauteilen kann demnach besser durch das Temperaturamplitudenverhältnis und die Phasenverschiebung bewertet werden. Das Temperaturamplitudenverhältnis $0 < TAV < 1$ gibt an, in welchem Verhältnis sich Temperaturschwankungen von der äußeren Oberfläche eines Außenbauteils in dessen innere Oberfläche bewegen. Das TAV ist der Kehrwert der Temperaturamplitudendämpfung v . Das sommerliche Wärmeschutzverhalten ist umso besser, je kleiner das TAV ist. (Marquardt, 2014, S. 154)

$$TAV = \frac{\max \theta_{si} - \min \theta_{si}}{\max \theta_{se} - \min \theta_{se}} \quad (2-19)$$

mit:

θ_{si} Innere Oberflächentemperatur

θ_{se} Äußere Oberflächentemperatur

Additiv gibt die Phasenverschiebung η den Zeitraum an, der zwischen dem Auftreten des Temperaturmaximums an der äußeren und inneren Bauteiloberfläche liegt. Grundsätzlich ist es wünschenswert, dass die maximalen Tagestemperaturen im Übergang von außen nach innen von den Materialien gespeichert und in abgeschwächter Version in den Innenraum weitergeleitet werden. Ziel ist, die maximalen Innenraumtemperaturen erst zur zweiten Nachthälfte zu erhalten, wenn die Aufheizung der Räume durch nächtliche Lüftung wieder ausgeglichen werden kann. Dies bedeutet eine Phasenverschiebung $\eta = 12$ h.

Vereinfacht kann der Hitzeschutz von Holz- und Stahlbetonkonstruktionen mit eindimensionalen Berechnungstools (z.B. www.u-wert.net) bewertet werden. Abbildung 2-36 zeigt beispielhaft die Analyse des sommerlichen Hitzeschutzes, indem der Temperaturverlauf eines heißen Sommertages zu unterschiedlichen Uhrzeiten simuliert wird. Im unteren Bild ist die Phasenverschiebung der Temperaturverhältnisse der inneren und äußeren Bauteiloberfläche dargestellt. Dabei sind die Lagen der Temperaturhöchstwerte gekennzeichnet. Die Phasenverschiebung beträgt 9,8 Stunden, wobei das Temperaturamplitudenverhältnis TAV mit 0,042 als gut bewertet werden kann (mit $\Delta\theta_{se} = 19,2^\circ\text{C}$, $\Delta\theta_{si} = 0,8^\circ\text{C}$). Die Tagesinnenoberflächentemperatur von ca. 25°C liegt dabei im noch behaglichen Bereich (siehe Abbildung 2-34).

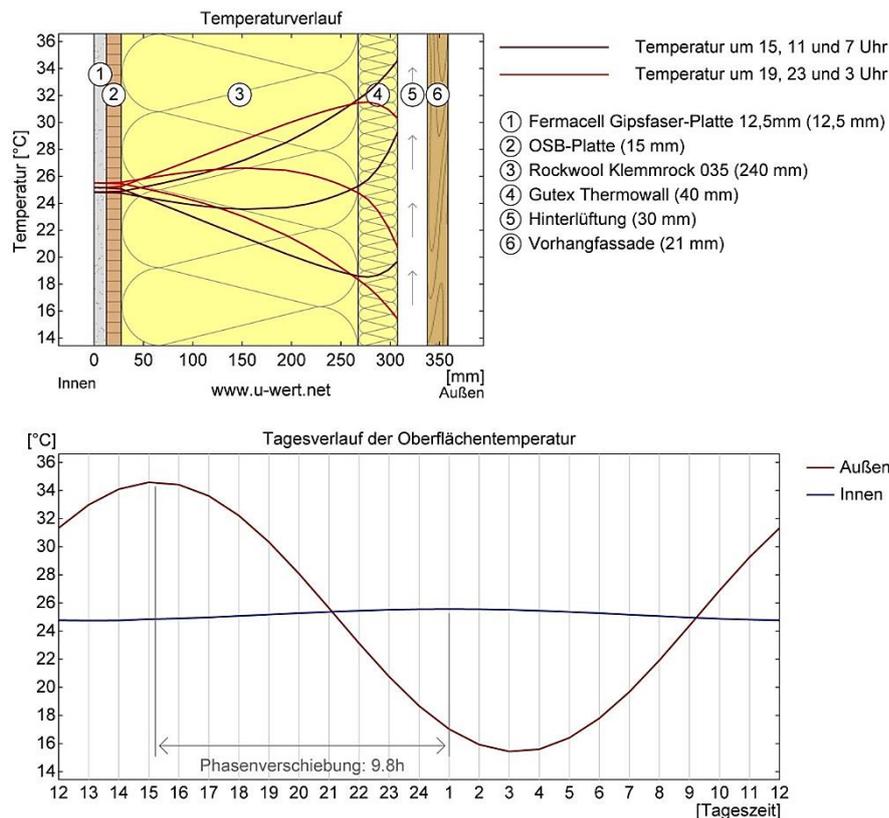


Abbildung 2-36: Analyse des sommerlichen Hitzeschutzes der Außenwand, Beispielprojekt CO₂-neutrale Grundschule, Hamburg (Eigene Berechnung mit www.u-wert.net)

Um eine „unbehaglich warme“ Raumluft zu vermeiden und einen sommerlichen Hitzeschutz zu gewährleisten, sollten die Baustoffe und Dämmstoffe folgende Eigenschaften aufweisen (holzbau handbuch R04 T05 F02, 2012):

- niedrige Wärmeleitfähigkeit λ oder
- hohe spezifische Wärmespeicherefähigkeit c – abhängig von der Stoffmasse

Eine hohe spezifische Wärmespeicherefähigkeit gewährleistet, dass die Wärmeenergie im Sommer zum großen Teil von der Konstruktion aufgenommen werden kann und somit nicht in den Innenraum abgegeben wird. Die Problematik, die bei der Hybridbauweise bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes besteht, ist die geringe wirksame Wärmespeicherefähigkeit von leichten Bauweisen wie die der Holzständerbauweise. (DIN 4108-4, 2013, S.27)

Die geringere Wärmespeicherefähigkeit der Außenwand in Holzbauweise kann durch die geeignete Wahl des Schichtenaufbaus kompensiert werden. Wird zum Beispiel die Dämmschicht zwischen Außenluft und Speichermasse angeordnet, werden die Schichten thermisch entkoppelt und der direkte Energieeintrag ist wesentlich geringer. Eine Erhöhung der Speichermasse kann auch durch Dämmstoffe mit hoher Rohdichte und hoher Wärmespeicherefähigkeit, wie z.B. Zellulose oder Holzfaserdämmung erreicht werden.

Daneben hat Holz allerdings den Vorteil der niedrigen Wärmeleitfähigkeit. Dadurch entsteht im Tag- und Nacht-Rhythmus eine Phasenverschiebung des Wärmeeintritts. Die hohen Temperaturen dringen also bei Holz weniger tief (ca. 50 – 60 mm) in das Bauteil und in den Innenraum ein. Im Vergleich besitzt Beton eine hohe Wärmeleitfähigkeit mit einer Eindringtiefe in das massive Bauteil von 100 - 150 mm.

2.5 Feuchteschutz

2.5.1 Schutz vor Schimmelbildung an der Bauteiloberfläche

Der Nachweis der Schimmelpilzfreiheit erfolgt nach DIN 4108-2 durch den Temperaturfaktor f_{Rsi} und wird parallel zur Ermittlung der Wärmebrückenberechnung durchgeführt. Die Randbedingungen zur Berechnung der Anschlussdetails können der DIN 4108 Beiblatt 2 entnommen werden. Voraussetzung für diese Angaben sind eine Außentemperatur von -5 °C , eine Innentemperatur von 20 °C sowie eine relative Luftfeuchte von 50% . Fenster sind davon ausgenommen. (DIN 4108-2, 2013, Abschnitt 6.2.1) Der Temperaturfaktor f_{Rsi} ist der Quotient aus der Differenz der (minimalen) Innenoberflächentemperatur θ_{si} zur Außenlufttemperatur θ_e und der Differenz der Innenluft- θ_i zur Außenlufttemperatur θ_e :

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\theta_i - \theta_e} \quad [-] \quad (2-20)$$

mit:

- θ_{si} Innere Oberflächentemperatur
- θ_{se} Äußere Oberflächentemperatur
- θ_i Raumtemperatur
- θ_e Außentemperatur

Die DIN 4108-2 gibt vor, dass die innere Oberflächentemperatur des Bauteils mindestens $12,6\text{ °C}$ betragen muss, damit die Gefahr der Schimmelpilzbildung gebannt ist und der Nutzer und die Bausubstanz vor Krankheiten sowie Schäden geschützt sind. Dies entspricht einem Temperaturfaktor $f_{Rsi} \geq 0,70$ und einer maximalen relativen Oberflächenfeuchte von 80% . Abbildung 2-37 verdeutlicht die Abhängigkeit der Schimmelpilztemperatur von der relativen Raumluftfeuchte und -temperatur.

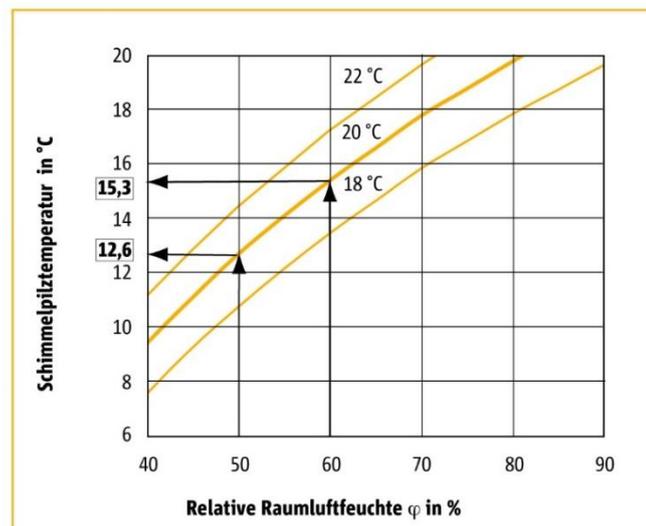


Abbildung 2-37: Abhängigkeit der Schimmelpilztemperatur von Raumluftfeuchte und -temperatur (Schöck, 2015, S. 17)

2.5.2 Schutz vor Tauwasserausfall im Bauteilinneren

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Feuchteschutznachweises ist die Untersuchung eines möglichen Tauwasserausfalls im Bauteilinneren. Tauwasser (bzw. Kondensat) entsteht, wenn warme, feuchte Luft aus dem Gebäudeinneren durch die opake Hülle nach außen strömt. Durch die Abkühlung der Luft sinkt deren Wasseraufnahmekapazität und die relative Luftfeuchtigkeit steigt. Überschreitet die tatsächliche Wassermenge die Aufnahmekapazität, fällt Tauwasser aus und die betroffenen Baumaterialien werden geschädigt, bzw. in ihrer Funktion beeinträchtigt.

Der stationäre Fall (ohne Einfluss der Feuchte auf die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen) kann mit Hilfe des Glaser-Verfahrens nach: DIN 4108-3 (DIN 4108-3, 2014) bestimmt werden. Dabei wird sowohl die Lage eines möglichen Tauwasserausfalls, als auch die Tauwassermenge innerhalb der Tauperiode von Dezember bis Februar bestimmt. Tritt während dieser Periode Tauwasser auf, kann der Nachweis immer noch erfüllt werden, insofern die anfallende Menge während der Verdunstungsperiode von Juni bis August wieder abtrocknen kann. Dabei darf der maximale Wert von 1,0 kg/m² bzw. 0,5 kg/m² (an Berührungsflächen von Schichten, die nicht kapillar wasseraufnahmefähig sind) nicht überschritten werden. (DIN 4108-3, S. 14, 2014) Zudem ist auf die maximal zulässige Stofffeuchte der einzelnen Materialien, wie z.B. Holz (5 M.-%) und Holzwerkstoffplatten (3 M.-%) zu achten. Der genaue Nachweis kann der DIN 4108-3, Anhang A2 entnommen werden. Die Festlegungen für Holzbauteile finden sich in der DIN 68800-2 (DIN 68800-2, 2012).

Die maximal zulässigen Stofffeuchten wurden sowohl bei den Konstruktionsbeispielen (Kapitel 5.3) als auch bei den im Konstruktionskatalog enthaltenen Anschlussdetails überprüft. Ein Tauwasserausfall im Bauteilinneren kann vermieden oder zumindest minimiert werden, wenn folgende Faustregeln eingehalten werden:

- Anordnung einer Luftdichtheitsschicht zum Innenraum, um den Lufttransport von innen nach außen zu vermeiden; diese Variante mit höchster Sorgfalt behandeln und Flankendiffusion über einbindende Innenwände berücksichtigen!
- Begrenzung der Tauwassermenge auf ein akzeptables Maß. Innerhalb der Verdunstungsperiode muss theoretisch mehr Wasser abtrocknen können, als während der Tauperiode anfällt!
- Anbringung einer diffusionsoffenen äußeren Bekleidung, um den Abtransport in der Verdunstungsperiode zu erhöhen!

So wirkt zum Beispiel eine diffusionsoffene Bahn vor der Tragkonstruktion und hinter einer hinterlüfteten Fassade als wasserführende Schicht, die bei einer Schlagregenbeanspruchung eine Durchfeuchtung des Bauteils verhindert. Auf der Innenseite ist eine durch Wasserdampf verursachte Durchfeuchtung mit Hilfe geeigneter Dampfbremsen ($0,5 < s_d < 1500$ m) zu vermeiden.

Die Dampfdichtigkeit einzelner Schichten wird über die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-] beziehungsweise über die wasserdampfdiffusionsäquivalente Schichtdicke s_d [m] definiert. Sie geben dimensionslos oder über die Schichtdicke beschrieben an, um welchen Faktor das betreffende Material gegenüber Wasserdampf dichter ist als eine gleich dicke ruhende Luftschicht beziehungsweise den Widerstand einer Bauteilschicht gegen Wasserdampfdiffusion. Bei mehrschichtigen Bauteilen addieren sich die einzelnen s_d -Werte zu einem Bauteilwert:

$$s_d = \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot d_i \text{ [m]} \quad (2-21)$$

Ob eine Schicht diffusionsoffen, -hemmend oder -dicht ist, entscheiden folgende Grenzwerte (DIN 4108-3, 2014, S.9):

- $s_d \leq 0,5$ m: diffusionsoffen
- $0,5 < s_d < 1500$ m: diffusionshemmend
- $s_d \geq 1500$ m: diffusionsdicht

Holzwerkstoffplatten – wie z.B. OSB-Platten – besitzen meist eine wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d von 30 bis 50 m und sind somit diffusionshemmend. Für die Funktion einer Dampfsbremse sind sie sehr gut geeignet. So bringen sie gegenüber diffusionsdichten ($s_d \geq 1500$ m) PE- Folien den Vorteil, dass die Feuchtigkeit nach außen und innen abgegeben werden und die Konstruktion während der Verdunstungsperiode austrocknen kann, bevor die Tauwasserbildung durch die Erhöhung der Stofffeuchte zu Materialschädigungen oder zu Beeinträchtigungen der Funktionssicherheit führt.

Nach DIN 4108-3, Abschnitt 5.3.2.3 kann für Holzbauaußenwände nach DIN 68800-2 der rechnerische Tauwassernachweis entfallen, wenn sie mit vorgehängten Außenwandbekleidungen und raumseitig mit einer diffusionshemmenden Schicht mit $s_d \geq 2$ m versehen sind. Weitere Beispiele für Konstruktionen, bei denen die Bedingungen nach Gebrauchsklasse GK0 erfüllt sind, werden in DIN 68800-2, Anhang A beschrieben.

Grundsätzlich ist bei der Berechnung nach dem Glaser-Verfahren für beidseitig geschlossene Wände eine zusätzliche rechnerische Trocknungsreserve von $100 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ a})$ auf Grund eines möglichen konvektiven Feuchteintrages und von Anfangsfeuchten zu berücksichtigen. Diese Berücksichtigung entfällt allerdings, sobald die Konstruktionen nach DIN 68800-2, Anhang A und mit wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicken nach DIN 68800-2, Tabelle 1 ausgeführt werden. (DIN 68800-2, 2012, S.11)

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) sollten nach Möglichkeit mit diffusionsoffenen Dämmmaterialien und einer gewissen Feuchtespeicherfähigkeit ausgeführt werden. In Kombination sind demnach auch die mineralischen den organischen Putzsystemen vorzuziehen. Als diffusionstechnisch günstig erweist sich ein um Faktor 5 bis 10 größerer s_d -Wert der rauminnenseitigen Bekleidung gegenüber dem WDVS. (Holzbau handbuch R04 T05 F03, 2013, S. 15 bis 17)

2.5.3 Wetter- und Schlagregenschutz

Unter den Feuchteschutz fällt auch der Schutz vor Schlagregenbeanspruchung. Diese entsteht bei Regen und gleichzeitiger Windanströmung auf die Fassade. Durch etwaige kapillare Saugwirkungen der Oberfläche oder Spalten sowie fehlerhafte Abdichtungen kann Regenwasser in die Konstruktion eindringen. Die Begrenzung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgt durch die Wahl geeigneter Außenwandbekleidungen.

Der Schlagregenschutz von Wänden wird in DIN 4108-3, Abschnitt 6 geregelt. Die Beanspruchungsintensität der Bekleidungen richtet sich nach der örtlichen Niederschlagsmenge, den Windverhältnissen und der Gebäudeart. In Deutschland unterscheidet man zwischen geringen, mittleren und starken Schlagregenbeanspruchungen und somit drei Beanspruchungsgruppen (vgl. DIN 4108-3, Bild 11). Beispielsweise wird die Regenschutzwirkung von Putzen und Beschichtungen durch die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d gemäß DIN EN ISO 12572 (DIN EN ISO 12572, 2001), den Wasseraufnahmekoeffizienten W_w gemäß DIN EN ISO 15148 (DIN EN ISO 15148, 2003) und dem Produkt aus beiden Größen beschrieben (siehe DIN 4108-3, Kapitel 6.3).

Der Wasseraufnahmekoeffizient gibt an, wie viel Wasser ein Stoff innerhalb einer bestimmten Zeit aufnimmt:

- saugend: $W_w > 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- wasserhemmend: $W_w < 2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- wasserabweisend: $W_w < 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
- wasserundurchlässig: $W_w < 0,001 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Ab einer mittleren Beanspruchung muss die Bekleidung wasserhemmend oder sogar wasserabweisend sein. Für wasserabweisende Putze und Beschichtungen gilt $W_w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ und $s_d \leq 2,0 \text{ m}$. Zum Vergleich besitzt Nadelholz (Fichte, axial) einen Wasseraufnahmekoeffizienten $W_w = 1,74 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ und ist somit als wasserhemmend einzustufen. (Niemz, 2006) Das bedeutet für die Fassadenausbildung, dass unbehandeltes Holz ohne zusätzliche Beschichtung bei mittlerer bis starker Schlagregenbeanspruchung nicht umfassend geeignet ist. Nähere Informationen zur Ausbildung des Wetterschutzes von Holzfassaden können dem Kapitel 2.5.3 entnommen werden.

Fugen und Anschlüsse sind nach DIN 4108-3, Kapitel 6.4.2 ebenfalls schlagregendicht auszuführen. Dabei sind sowohl Fugendichtstoffe nach DIN 18540 (DIN 18540, 2014), Dichtbänder und Folien als auch konstruktive Maßnahmen zulässig. Je nach Schlagregenbeanspruchung gibt DIN 4108-3, Tabelle 5 (siehe Tabelle 2-12) die Fugenabdichtungsarten an.

Tabelle 2-12: Beispiele für die Zuordnung von Fugenabdichtungsarten und Beanspruchungsgruppe (DIN 4108-3, 2012)

Zeile	Fugenart	Beanspruchungsgruppe I	Beanspruchungsgruppe II	Beanspruchungsgruppe III
		geringe Schlagregenbeanspruchung	mittlere Schlagregenbeanspruchung	starke Schlagregenbeanspruchung
1	Vertikal-fugen	Konstruktive Fugenausbildung ^a		
2		Fugen nach DIN 18540 ^a		
3	Horizontal-fugen	Offene, schwellenförmige Fugen, Schwellenhöhe $h > 60 \text{ mm}$	Offene, schwellenförmige Fugen, Schwellenhöhe $h > 80 \text{ mm}$	Offene, schwellenförmige Fugen, Schwellenhöhe $h > 100 \text{ mm}$
4		Fugen nach DIN 18540 mit zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen, z.B. mit Schwellenhöhe $h > 50 \text{ mm}$		
^a Fugen nach DIN 18540 dürfen nicht bei Bauten in einem Bergsenkungsgebiet verwendet werden. Bei Setzungsfugen ist die Verwendung nur zulässig, wenn die Verformungen bei der Bemessung der Fugenmaße berücksichtigt werden.				

2.6 Luftdichtheit

2.6.1 Allgemeine Anforderungen

Die Qualität der Luftdichtheit beeinflusst nahezu alle Funktionen der Gebäudehülle: Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz, Brandschutz, Dauerhaftigkeit der Konstruktion, Behaglichkeit und Heizkosten. (holzbau handbuch R01 T01 F08, 2004, A3.1) Eine Luft- und Winddichtheit (vgl. Kapitel 2.7) wird gewähr-

leistet, wenn die Hülle eines Gebäudes bzw. die Fassadenkonstruktion nicht oder nur in geringem Maße mit Luft durchströmt wird. Ursachen hierfür können Windeinflüsse, die Thermik sowie raumluftechnische Anlagen sein. Es existieren zwei vereinfachte Konstruktionsprinzipien, um die Luftdichtheit einer Konstruktion und ihrer Anschlussbereiche lückenlos zu gewährleisten (Peper, 2003):

Tabelle 2-13: Planungsgrundsätze zur Gewährleistung von Luftdichtheitsebene nach Peper und Feist

Prinzip	Beschreibung
I	Der Verlauf der Luftdichtheitsebene in den Bauteilen der Gebäudehülle muss von einem Stift, ohne ein einziges Mal abzusetzen, abgefahren werden können.
II	Einer Ebene muss die abdichtende Funktion zugeordnet werden. Mehrere nicht ausreichend dichte Ebenen hintereinander ergeben keine ausreichende Luftdichtheit!

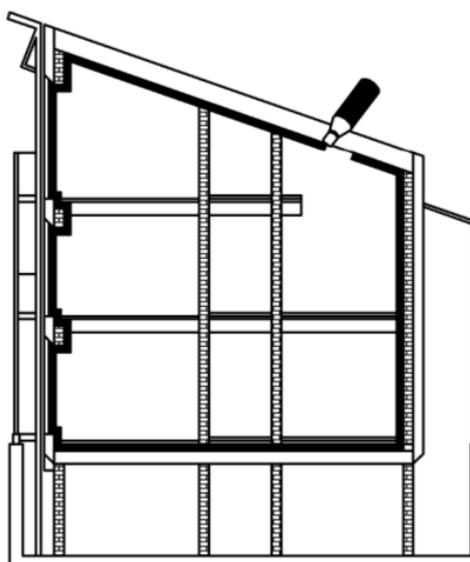


Abbildung 2-38: Konstruktionsprinzip I, Abbildung aus (DIN 4108-7, 2011)

Die Anforderungen an die Einhaltung der Luftdichtheit von Gebäuden wird in der DIN 4108-7 (DIN 4108-7, 2011) definiert. Dieser Norm können auch Beispielausführungen für Überlappungen, Anschlüsse, Durchdringungen und Stöße für unterschiedliche Anschlussbereiche entnommen werden. Stöße können dabei mittels Klebebänder, Klebmassen oder Fugenfüller abgedichtet werden. Nähere Informationen zu regelkonform ausgeführten Anschlüssen können dem Konstruktionskatalog entnommen werden.

Darüber hinaus werden die Anforderungen an die Luftdichtheit grundsätzlich in der EnEV geregelt. Eine Überprüfung der Luftdichtheit wird nach EnEV 2014 für Gebäude ohne raumluftechnische Anlagen zwar nicht zwingend vorgeschrieben, jedoch hinsichtlich der Qualitätskontrolle empfohlen. (Jungmann, 2014, S.16) Wird ein Blower-Door-Test (siehe Kapitel 2.6.2) durchgeführt, darf man beim Nachweis des energiesparenden Wärmeschutzes die Lüftungswärmeverluste mit einem Luftwechsel von $0,6 \text{ h}^{-1}$ anstatt mit einem Luftwechsel von $0,7 \text{ h}^{-1}$ berechnen.

Nach DIN 1045 (DIN 1045, 1988) hergestellte Betonbauteile gelten als luftdichte Bauteile. (DIN 4108-7, 2011, S.17) Bei Außenwänden in Holzbauweise übernimmt meist die aussteifende Schicht (innere Beklei-

der Kernwand) gleichzeitig die Funktion der Luftdichtheit. Dabei sind Luft- und Winddichtheitsschicht voneinander entkoppelt. Grund dafür ist, dass die Luftdichtheitsschicht raumseitig der Wärmedämmung verlegt wird, um Wärmeverluste und Kondensat infolge von Konvektion zu verhindern und die Winddichtheitsschicht außenseitig der Wärmedämmung anzutreffen ist, um das Einströmen von Außenluft und somit die Hinterströmung der Dämmebene zu vermeiden.

2.6.2 Blower-Door-Test

Der Nachweis der Luftdichtheit bzw. die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit kann nach der DIN EN 13829, Anhang A (DIN EN 13829, 2001) mit Hilfe des Blower-Door-Tests geführt werden. Dabei wird zum einen die Luftwechselrate n_{50} pro Stunde bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen innen und außen ermittelt:

$$n_{50} = \frac{V_{50}}{V} [h^{-1}] \quad (2-22)$$

mit:

V_{50} Volumenstrom [m^3/h]

V Luftvolumen [m^3]

Zum anderen muss für Gebäude oder Gebäudeteile mit einem Luftvolumen über $1500 m^3$ der Nachweis der Luftdurchlässigkeit geführt werden. Die Luftdurchlässigkeit q_{50} ist der Quotient aus dem Volumenstrom V_{50} durch die Gebäudehüllfläche A_E :

$$q_{50} = \frac{V_{50}}{A_E} [m^3/(h \cdot m^2)] \quad (2-23)$$

mit:

V_{50} : Volumenstrom [m^3/h]

A_E : Gebäudehüllfläche [m^2]

Diese hüllflächenbezogene Empfehlung erfordert bei größeren Gebäuden eine dichtere Außenhülle als bei kleinen. (holzbau handbuch R01 T01 F08, 2004, S. 6) Das Gebäude gilt als ausreichend luftdicht, wenn die Grenzwerte nach Tabelle 2-14 eingehalten werden.

Der Nachweis kann bei Nichtwohngebäuden nach EnEV 2014 bei der Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs auch Zonenweise erfolgen. Möchte man die Wärmerückgewinnung und die regelungstechnisch optimierten Luftwechselraten in Lüftungsanlagen bei Wohngebäuden mit anrechnen, muss die Luftdichtheit zwingend nachgewiesen werden. (Jungmann, 2014, S. 16)

Bei höheren Energieeffizienzstandards werden natürlich höhere Anforderungen an die Luftdichtheit gestellt. So beträgt die Luftwechselrate beim Passivhausstandard $n_{50} \leq 0,6 h^{-1}$. (holzbau handbuch R01 T03 F10, 2002, S. 18)

Tabelle 2-14: Grenzwerte der Luftwechselrate n_{50} und Luftdurchlässigkeit q_{50} nach EnEV 2014 und DIN 4108-7 (Eigene Abbildung nach EnEV 2014 im Bild, S.16 und DIN 4107-7)

Gebäudetyp in Abhängigkeit des Luftvolumens	Vorhandensein von raumluftechnischen Anlagen	Luftwechselrate n_{50}	Luftdurchlässigkeit q_{50}
Wohn- und Nichtwohngebäude mit einem Luftvolumen bis 1500 m ³	Ohne raumluftechnische Anlagen	$n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$	Keine Anforderung
	Mit raumluftechnischen Anlagen	$n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$	Keine Anforderung
Gebäude oder Gebäudeteile mit einem Luftvolumen über 1500 m ³ , bezogen auf die Hüllfläche des Gebäudes	Ohne raumluftechnische Anlagen	$n_{50} \leq 4,5 \text{ h}^{-1}$	$q_{50} \leq 3,0 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$
	Mit raumluftechnischen Anlagen	$n_{50} \leq 2,5 \text{ h}^{-1}$	

Die Luftdichtigkeitsmessungen werden bei einem Neubau idealerweise zweimal durchgeführt, wobei die erste Messung direkt nach Fertigstellung der luftdichten Ebene vor dem weiteren Innenausbau angesetzt werden sollte. Die zweite Messung erfolgt dann nach Bezugsfertigkeit des Gebäudes, um sicherzustellen, dass die luftdichte Schicht nicht durch Nachfolgewerke beschädigt wurde.

2.6.3 Konstruktionsbedingte Leckagen im Hybridbau

Die DIN 4108-7 weist allerdings darauf hin, dass selbst bei Einhaltung der Luftwechselratengrenzwerte lokale Fehlstellen nicht auszuschließen sind. Demnach ist der Blower-Door-Test kein Nachweis für eine sachgemäße Planung und Ausführung eines Konstruktionsdetails. Beim Holzbau wie auch Hybridbau existieren typische Leckagen, auf welche beim Bau besonders zu achten ist. Abbildung 2-39 zeigt die bei 50 Holzhäusern am häufigsten vorkommenden Leckagen.

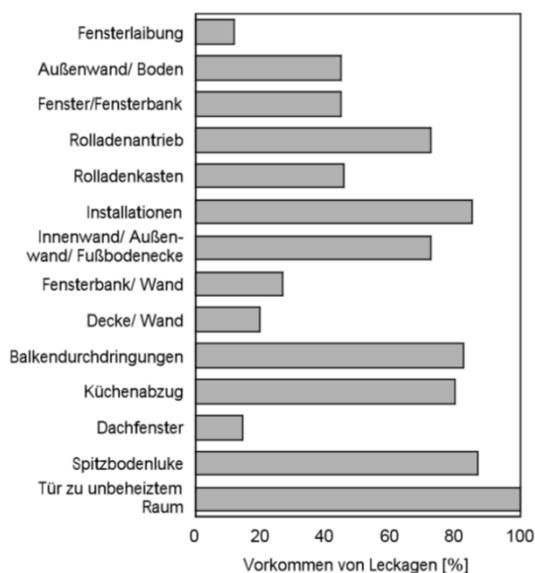


Abbildung 2-39: Auftrittshäufigkeit Leckagen, entnommen aus Informationsdienst Holz (holzbau handbuch R01 T01 F08, 2004, A3.1.5)

Durch den hohen Vorfertigungsgrad der Holzfassadenelemente können Anschlussstellen wie Fensterlaibungen, -brüstungen und -stürze sowie Installationsdurchdringungen bereits im Werk qualitativ hochwertig luftdicht ausgeführt werden. Auf der Baustelle sind bei der Montage der Elemente lediglich die Anschlussstellen Außenwand-Boden, Innenwand-Außenwand-Fußbodenecke und Decke-Wand besonders zu berücksichtigen.

Beispielsweise muss beim Anschluss der Luftdichtheitsschicht von Außenwänden an die Bodenplatte darauf geachtet werden, dass auch hinter den Befestigungselementen die Abdichtung durchläuft. Folien sollten immer mit einem Klebeband oder einer Dichtungsmasse mit der Bodenplatte verbunden werden. Auf Grund unvermeidbarer Unebenheiten bei der Betonoberfläche reicht beispielsweise ein Anpressen der Bahnen durch Aufbringen eines Estrichs allein nicht aus. Auch Hohlräume, die eine Hinterströmung der Konstruktion und somit eine Auskühlung zulassen könnten, sollten beim Sockelanschluss vermieden werden. (holzbau handbuch R01 T01 F08, 2004, S. 7-8) Wie die einzelnen Überlappungen und Anschlussstellen im Detail auszuführen sind, kann dem Konstruktionskatalog (Anhang 2) entnommen werden.

Eine Bauteilschicht gilt als luftdicht, wenn sie eine Luftdurchlässigkeit von $q_{50, \text{Baustoff}} \leq 0,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (holzbau handbuch R01 T01 F08 2004, S. 6) aufweist. Gebräuchliche Materialien beim Holztafelbau sind Holzwerkstoffplatten, Gipsbauplatten, Baupappen, Baupapiere und Polyethylenfolien. Für den Erwerb des RAL-Gütezeichens müssen die Hersteller diesen Wert mittels des Blower-Door-Tests nachweisen.

2.7 Winddichtheit

Die Winddichtheitsschicht ist an der Außenseite der Wärmedämmung anzutreffen und soll eine Hinterströmung der Dämmebene durch Außenluft vermeiden. Die Winddichtheit wird grundsätzlich durch die wasserführende Schicht der Außenbauteile, wie Außenputz oder geschlossene Fassadenbekleidung, gewährleistet. Ferner werden zur Herstellung der Winddichtheit meist Holzweichfaserplatten, Bitumenpappen auf Holzschalung, Unterspannbahnen oder ausreichend elastische Dämmstoffplatten mit hohem Strömungswiderstand verwendet.

2.8 Brandschutz

2.8.1 Anforderungen im Brandfall

Eine genauere Definition für den Brandfall erfolgt in der BauPVO Anhang I. Die darin enthaltenen Anforderungen sind:

- a) Tragfähigkeit während eines bestimmten Zeitraums
- b) Entstehung von Feuer und Rauch während eines bestimmten Zeitraums
- c) Ausbreitung von Feuer und Rauch auf benachbarte Bauwerke
- d) Rettung von Personen (Möglichkeit der Eigen- und Fremdrettung)
- e) Berücksichtigung der Sicherheit der Rettungsmannschaften

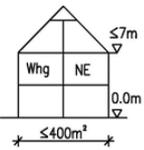
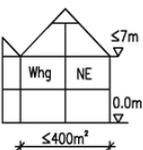
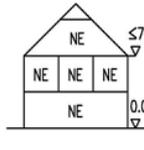
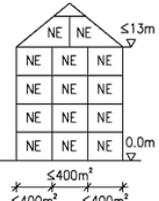
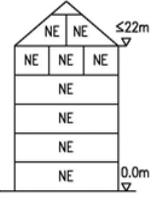
Diese Anforderungen finden sich auch in § 14 „Brandschutz“ der Musterbauordnung wieder. Das allgemein bestehende Konzept der europäischen Brandschutznormung für Bauwerke, Bauwerksteile und Produkte umfasst (Hertel, 2000):

- a) Prüf- und Klassifizierungsnormen im Bereich
 - a1) Feuerwiderstand
 - a2) Brandverhalten
 - a3) Bedachungen bei Brandbeanspruchung von außen
- b) Brandschutzregelungen in Produktnormen
- c) Brandschutzbemessung nach Eurocodes
- d) Ingenieurmethoden für den Brandschutz

2.8.2 Feuerwiderstand nach Musterbauordnung

Ein wichtiger Aspekt ist die nichttragende Eigenschaft der Außenwandelemente, die eine Anwendung der Holzbauelemente nach bauordnungsrechtlichen Vorgaben bis zur Hochhausgrenze (Höhe oberster Geschossfußboden gegenüber mittlerer Geländehöhe ≤ 22 m) ermöglicht. Der Anwendungsbereich ergibt sich aus der Muster-Bauordnung (MBO) bzw. den jeweiligen Landesbauordnungen (siehe Tabelle 2-15 und Tabelle 2-16). Die nichttragende Funktion bedeutet, dass die Elemente keinen Beitrag zur Standsicherheit des Gebäudes leisten, d.h. es wird keine tragende oder aussteifende Funktion für das Gesamttragwerk übernommen. Bezogen auf den Brandfall müssen die Elemente Eigen- und Windlasten geschossweise in das Tragwerk übertragen, so dass die Außenwände über dem Brandgeschoss an ihren Ort verbleiben.

Tabelle 2-15: Gebäudeklassen nach Musterbauordnung (MBO) (Eigene Darstellung)

Gebäudeklasse	1	2	3	4	5
Gesamtfläche	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	-	-	-
Fläche einer Nutzungseinheit	-	-	-	≤ 400 m ²	-
Anzahl der Nutzungseinheiten	≤ 2	≤ 2	-	-	-
					

Hinweis: Gebäudeklasse 5 mit Aufenthaltsräumen > 22 m = Hochhäuser, Whg - Wohnung, NE - Nutzungseinheit

Tabelle 2-16: Anwendung von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von den Gebäudeklassen (Eigene Darstellung)

Bauteil	MBO	Gebäudeklasse				
	§2	1	2	3	4	5
Tragende Wände, Stützen	§27	-	fh	fh	hf	fb
Tragende Wände, Stützen im Keller-geschoss		fh	fh	fb	fb	fb
Tragende Wände, Stützen im Dach-geschoss, wenn Aufenthaltsräume darüber möglich sind		-	fh	fh	hf	fb
Nichttragende Außenwände	§28	-	-	-	nb oder fh	nb oder fh
Trennwände	§29	-	fh ¹⁾	fh	hf	fb
Decken	§31	-	fh	fh	hf	fb
Decken im Dachgeschoss, wenn Aufenthaltsräume darüber möglich sind		-	fh	fh	hf	fb
Decken im Kellergeschoss		fh	fh	fb	fb	fb
Brandwand / Brandwandersatzwand	§30	hf ²⁾	hf ²⁾	hf ²⁾	hf + M	fb + M

1) gilt nicht für Wohngebäude, 2) Gebäudeabschlusswände in F30/F90-Bauweise

fh – feuerhemmend, hf – hochfeuerhemmend, fb – feuerbeständig, M – mechanischer Stoß

nb – nicht brennbar

■ Holzanwendung ohne Abweichungen von MBO möglich

2.8.3 Klassifizierungsmöglichkeiten

2.8.3.1 Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen

Das Brandverhalten von Baustoffen wird nach DIN EN 13501-1 (DIN EN 13501-1, 2010) klassifiziert. Die Klasse des Brandverhaltens der Baustoffe wird zusammen mit den Brandnebenerscheinungen Rauchentwicklung sowie brennendes Abtropfen bestimmt und angegeben. Tabelle 2-17 zeigt das Format der Klassifizierung.

Tabelle 2-17: Klassifizierung des Brandverhaltens (DIN EN 13501-1, 2010)

Brandverhalten		Rauchentwicklung		Brennendes Abtropfen
A1 bis F	-	s 1, 2 oder 3	,	d 0, 1 oder 2

Die Bestimmung des Brandverhaltens einer Platte erfolgt ohne Notwendigkeit einer weiteren Prüfung (Classification Without Further Testing - CWFT) oder auf Grundlage einer Prüfung nach den in DIN EN 13501-2:2010-01 angegebenen Prüfnormen. Ohne weitere Prüfung können zum Beispiel die Produkte OSB gemäß DIN EN 300 (DIN EN 300, 2006) oder Gipsplatten nach DIN EN 520 (DIN EN 520, 2009) eingestuft werden, wenn die Bedingungen nach Entscheidung der Kommission der Europäischen Gemeinschaften 2003/43/EG (inkl. Änderungen Stand 05.10.2006) eingehalten werden. Für das Produkt OSB wurde das Brandverhalten in Abhängigkeit der Endnutzungsbedingungen in der DIN EN 13986 (DIN EN 13986, 2015, Tabelle 8) definiert. Für das Produkt Gipsplatten wurde das Brandverhalten in Abhängigkeit der Endnutzungsbedingungen in der DIN EN 520, Anhang B verankert.

In Deutschland ist die Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen zu den möglichen Klassifizierungen des Brandverhaltens der Baustoffe in der Bauregelliste A-1 (BRL, 2015), Anlage 0.2.2 aufgeführt.

2.8.3.2 Klassifizierung des Feuerwiderstandes

Der Feuerwiderstand von Bauteilen wird nach DIN EN 13501-2 (DIN EN 13501-2, 2010) ermittelt. Hauptsächlich werden die nachfolgenden charakteristischen Leistungseigenschaften verwendet.

- R – Tragfähigkeit (Résistance)
- E – Raumabschluss (Étanchéité)
- I – Wärmedämmung (Isolation)
- M – Widerstand gegen mechanische Beanspruchung

Werden zum Beispiel die Kriterien REI oder EI für einen bestimmten Zeitraum t eingehalten, kommt es nicht zu einer Entzündung auf der brandabgewandten Seite des Bauteils. Ist das Kriterium in der Klassifizierung enthalten, besitzt das Bauteil neben der raumabschließenden Funktion auch eine tragende Funktion. Der Widerstand gegen mechanische Beanspruchung M ist die Fähigkeit eines Bauteils, einer Stoßbeanspruchung zu widerstehen, die den Fall repräsentiert, wenn ein Tragfähigkeitsverlust eines anderen Bauteils im Brandfall eine Stoßbeanspruchung auf das betroffene Bauteil verursacht. Das Bauteil muss der Stoßbeanspruchung widerstehen, ohne das R-, E- und/oder I-Verhalten zu beeinflussen, um die Klassifizierung durch den Zusatzbuchstaben M zu erlangen. Bauteile, die eine Stoßbeanspruchung aufnehmen müssen sind zum Beispiel Treppenraumwände oder Brandwände. Die charakteristischen Leistungseigenschaften werden mit Leistungskriterien hinterlegt.

Tabelle 2-18: Hinterlegung der charakteristischen Leistungseigenschaften mit Leistungskriterien nach DIN EN 13501-2

R – Tragfähigkeit	E – Raumabschluss	I – Wärmedämmung	W – Strahlung	M – Widerstand gegen mech. Beanspruchung
<u>Begrenzte Verformung:</u> - vertikal: $C = h/100$ - horizontal: $D = L^2(400 d)$ <u>Begrenzte Verformungsrate:</u> - vertikal: $dD/dt = 3h/1000$ - horizontal: $dD/dt = L^2/(9000 d)$	- Entzündung Wattebausch - Spalte und Öffnungen - Auftreten von andauernden Flammen an der unbeflammten Seite	<u>Begrenzte mittlere und maximale Temperaturerhöhung auf brandabgewandter Seite:</u> - $\Delta t_{mW} \leq 140 \text{ K}$ und - $\Delta t_{eW} \leq 180 \text{ K}$	<u>Begrenzung:</u> $\leq 15 \text{ kW/m}^2$	<u>Stoßprüfung nach DIN EN 1363-2:</u> Stoßenergie 3000 Nm (Aufprall Stoßkörper aus Bleischrotsack 200 kg aus Fallhöhe 1,5 m)

In Deutschland ist die Zuordnung der bauaufsichtlichen Anforderungen zu den möglichen Klassifizierungen des Brandverhaltens der Baustoffe in der Bauregelliste A-1 (BRL, 2015), Anlage 0.1.2 aufgeführt.

2.8.4 Bemessung mit Rechen- und Tabellenverfahren

2.8.4.1 Bemessung der nichttragenden Holzrahmenbauelemente

Für die Wandelemente kann die Tragfähigkeit (Kriterium R) und die raumabschließende Funktion (Kriterien EI) nach DIN EN 1995-1-2 (DIN EN 1995-1-2, 2010) in Verbindung mit dem nationalen Anhang DIN EN 1995-1-2/NA (DIN EN 1995-1-2/NA, 2010) bemessen werden. Die darin enthaltenen Rechenverfahren (Kriterium R in DIN EN 1995-1-2, Anhang C und Kriterium EI in Anhang E) sind auf eine Feuerwiderstandsdauer ≤ 60 Minuten sowie bestimmte Material- und Schichtaufbauten begrenzt.

Nachfolgend wird nur die raumabschließende Funktion (Kriterien EI) bestimmt, um einen Eindruck über den Temperaturdurchgang bzw. die Brandschädigung des Holzrahmenbauteils (Kernelement) zu erhalten. Der Temperaturdurchgang wird bei der brandschutztechnischen Bewertung der Anschlussdetails berücksichtigt. Der Tragfähigkeitsnachweis unter Brandeinwirkung entfällt, da es sich um nichttragende Fassadenelemente handelt. Die Regeln gelten für geschlossene Holzrahmenbauelemente mit maximal zweilagigen Bekleidungen aus Holzwerkstoffen nach DIN EN 13986 und Gipswerkstoffen des Typs A, H und F nach DIN EN 520. Als Dämmstoffe können werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (Stein- und Glaswolle) nach DIN EN 13162 (DIN EN 13162, 2015) eingesetzt werden. Für andere Materialien sind die Charakterisierungsdaten t_{ch} , β_i , t_f , d_{char} und t_{test} nach dem Prüfverfahren in DIN EN 13381-7 (DIN EN 13381-7, 2014) zu ermitteln. Um das Verfahren für die raumabschließende Funktion zu erweitern, wurde ein modifiziertes Verfahren entwickelt (Schleifer, 2009). Dieses soll in die neue Fassung der DIN EN 1995-1-2 integriert werden. Beide Berechnungsmethoden sind additive Verfahren, in denen der Ausfall einzelner Schichten über Temperaturkriterien gesteuert wird. Es wird zwischen Wärmedämmwirkung t_{ins} der einzelnen Schichten des Bauteils und der Schutzzeit t_{ch} der Brandschutzbekleidung unterschieden.

Für raumabschließende Bauteile soll nachgewiesen werden, dass:

$$t_{ins} \leq t_{req} \quad (2-24)$$

mit:

t_{ins} Zeit bis zum Erreichen der Temperaturerhöhung

$\Delta t_{MW} \leq 140$ K und $\Delta t_{EW} \leq 180$ K auf der feuerabgewandten Seiten [Min]
(EW - Einzelwert, MW – Mittelwert)

t_{req} erforderliche Feuerwiderstandsdauer für die raumabschließende Funktion der Konstruktion [Min]

Gemäß § 28 MBO wird für nichttragende Außenwände eine Feuerwiderstandsdauer $t_{req} \geq 30$ Minuten in den Gebäudeklasse 3 bis 5 gefordert. Der Wert t_{ins} darf als Summe der Beiträge der in der Konstruktion verwendeten einzelnen Lagen berechnet werden:

$$t_{ins} = t_{ins,0,i} k_{pos} k_j \quad (2-25)$$

mit:

$t_{ins,0,i}$ Grundwert der Wärmedämmung der Lage „i“, in Minuten

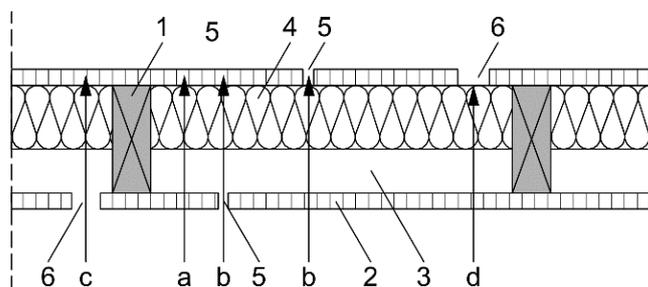
k_{pos} Positionsbeiwert

k_j Fugenbeiwert

Der brandschutztechnische Nachweis erfolgt nur für die Kernwand (siehe Abbildung 2-40) unter Berücksichtigung der Leistungskriterien EI. Die brandschutztechnischen Anforderungen für nichttragende Wände (Kapitel 2.8.2, Tabelle 2-16) sind damit abgedeckt.

In der unteren Rechnung wird nur der Wärmedurchgangsweg a berücksichtigt. Der Wärmedurchgangsweg b kann über den Fugenbeiwert k_j in die Rechnung einbezogen werden. Werden die Fugen mit Latten oder Bekleidungstreifen gleicher Dicke hinterlegt, kann der Fugenbeiwert $k_j = 1$ gesetzt werden.

Die Wärmedurchgangswege c und d gehen in die Rechnung ein, wenn in der inneren oder äußeren Bekleidung Installationsöffnungen enthalten sind. Der Wärmeübergangsweg c entfällt, wenn eine Installationsebene zur Anwendung kommt. Der Wärmedurchgangsweg d entfällt, wenn Öffnungen in der äußeren Bekleidungslage, u.a. im Bereich von Außenbeleuchtungen oder elektrisch gesteuerten Rollläden bzw. Jalousien durch Einhausung mit derselben Bekleidung entsprechender Dicke versehen werden.



Legende:

- 1 Holzbauteil
- 2 Bekleidung
- 3 ungedämmter Hohlraum
- 4 Hohlraumdämmung
- 5 Bekleidungsfuge nicht hinterlegt durch Latten, Balken oder Stiele
- 6 Lage einer Installation

a-d Wärmedurchgangswege

Abbildung 2-40: Darstellung der Wärmeübertragungswege durch eine raumabschließende Konstruktion (DIN EN 1995-1-2, 2010)

Beispiel

Aufbau Kernwand:

15 mm OSB (→ EN 13986)

40 und 200 mm Mineralfaserdämmung (→ EN 13162)

16 mm MDF (→ EN 13986)

Tabelle 2-19: Raumabschließende Wirkung mit Gefachdämmung aus Glaswolle (15 kg/m³)

(Eigene Darstellung)

Schicht	Dicke [mm]	Material	$t_{ins,0,i}$	k_{pos}	k_j	$t_{ins,i}$	
1	15	OSB (→ EN 13986)	16,5	0,84	1,0	13,9	
2	40	Glaswolle	3,6	1,0	1,0	3,6	
	200	(→ EN 13162)	18			18	
3	16	MDF (→ EN 13986)	17,6	0,88	1,0	15,5	
						$t_{ins} =$	32,9 Min
							47,3 Min

Tabelle 2-20: Raumabschließende Wirkung mit Gefachdämmung aus Steinwolle (26 kg/m³)
(Eigene Darstellung)

Schicht	Dicke [mm]	Material	$t_{ins,0,i}$	k_{pos}	k_j	$t_{ins,i}$
1	15	OSB (→ EN 13986)	16,5	0,84	1,0	13,9
2	40 200	Steinwolle (→ EN 13162)	8,0 40,0	1,0	1,0	8,0 40,0
3	16	MDF (→ EN 13986)	17,6	1,0* 4,9	1,0	17,6 86,2

Bemerkung: *Wert $k_{pos} = 1,0$, da Steinwolle mit Dicke < 45 mm!

$t_{ins} =$ 39,5 Min
≥ 60 Min

Wird die Kernwand mit einer Dämmdicke $d = 200$ mm ausgeführt, werden folgende Klassifizierungen erreicht:

- EI 30 mit Glaswolle ($\rho = 15$ kg/m³) und
- EI 60 mit Steinwolle ($\rho = 26$ kg/m³).

Für Gefachdämmstoffe aus Holzfasern oder Zellulose müssen zum Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit als Verwendbarkeitsnachweise, u.a. allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse vorliegen.

2.8.4.2 Bemessung Stahlbetonelemente

Die Bemessung kann nach DIN EN 1992-1-2 (DIN EN 1992-1-2, 2010) in Verbindung mit dem nationalen Anhang DIN EN 1992-1-2/NA (DIN EN 1992-1-2/NA, 2010) durchgeführt werden. Neben den vereinfachten Berechnungsverfahren sind tabellarische Daten zu den Mindestmaßen und –achsabständen der Bauteile unter Normbrandbeanspruchung enthalten (vgl. Tabelle 2-21). Die Tabellenwerte gelten für Normalbeton von 2000 bis 2600 kg/m³ nach DIN EN 206-1 (DIN EN 206, 2014) mit quarzhaltigen und kalksteinhaltigen Zuschlägen. Bei Verwendung der Mindestwerte müssen keine weiteren Nachweise zur Schub- und Torsionsbeanspruchung sowie Verankerung der Bewehrung geführt werden. Nach DIN EN 1992-1-2, Kapitel 4.5 sind explosive Betonabplatzungen unwahrscheinlich, wenn der Feuchtigkeitsgehalt des Betons in den Beanspruchungsklassen X 0 und XC 1 nach DIN EN 1991-1-1 Werte $2,5 < k \leq 3,0$ annimmt. Wird der Achsabstand der Bewehrung $a \geq 70$ mm ausgeführt, sollte eine Oberflächenbewehrung nach DIN EN 1992-1-2, Kapitel 4.5.2 (2) angeordnet werden.

Tabelle 2-21: Mindestmaße und –achsabstände für statisch bestimmt gelagerte, einachsig und zweiachsig gespannte Stahlbeton- und Spannbetonplatten gemäß DIN 1992-1-2 (DIN EN 1992-1-2, 2010, Tab. 5.8)

Feuerwider- standsklasse REI	Mindestabmessungen [mm]			
	Plattendicke h_s [mm]	Achsabstand a [mm]		
		einachsig	zweiachsig	
			$l_y/l_x \leq 1,5$	$1,5 < l_y/l_x \leq 2$
30	60	10*	10*	10*
60	80	20	10*	15*
90	100	30	15*	20

Bemerkungen:

l_x, l_y – Spannweiten einer zweiachsig gespannten Platte, wobei l_y die längere Spannweite ist

a – Achsabstand, kleinster Abstand des Betonstahls oder Spannstahls von der brandbeanspruchten Bauteiloberfläche

* Normalerweise reicht die nach DIN EN 1992-1-1 erforderliche Betondeckung aus.

Bei Spannbetonplatten muss der Achsabstand gegebenenfalls nach Abs. 5.2 (5) DIN EN 1992-1-2 vergrößert werden.

2.9 Schallschutz

2.9.1 Anforderungen und Zielwerte

Der Schallschutz im Hochbau ist in Deutschland wegen der zunehmend verdichteten Bauweise und den innerstädtisch vorhandenen hohen Außenlärmbelastungen ein wesentliches Kriterium zur Schaffung eines gesunden Wohn- und Arbeitsumfelds.

In Deutschland wurden hierzu bauaufsichtliche Anforderungen festgelegt, die im Wesentlichen in DIN 4109 (DIN 4109, 1989) niedergeschrieben sind. Die Nachfolgenorm, die in diesem Jahr erschienen ist, untergliedert sich in die Teile Mindestanforderungen (DIN 4109-1, 2016), rechnerische Nachweise zur Erfüllung der Anforderungen (DIN 4109-2, 2016), Rahmendokument zu rechnerischen Nachweisen zum Schallschutz (DIN 4109-31, 2016), Daten für die rechnerischen Nachweise für den Massivbau (DIN 4109-32, 2016), Holz-, Leicht- und Trockenbau (DIN 4109-33, 2016), Vorsatzschalen vor massiven Bauteilen (DIN 4109-34, 2016), Elemente, Fenster, Türen und Vorhangfassaden (DIN 4109-35, 2016) und gebäudetechnische Anlagen (DIN 4109-36, 2016) sowie bauakustische Prüfungen (DIN 4109-4, 2016). Die in DIN 4109-1 festgelegten Anforderungen betreffen den Schallschutz im Gebäudeinneren inklusive der Lärmentwicklung von haustechnischen Anlagen sowie den Schallschutz gegen Außenlärm. Die Anforderungen sind unabhängig von der Bauweise festgelegt und müssen als Mindestschallschutz auch ohne weitere vertragliche Regelungen eingehalten werden.

Zur Quantifizierung des Schallschutz innerhalb des Gebäudes werden die Kenngrößen R'_w (bewertetes Bau-Schalldämm-Maß) für den Luftschallschutz sowie $L'_{n,w}$ (bewerteter Norm-Trittschallpegel) für den Trittschallschutz verwendet. Der Schallschutz beinhaltet hierbei sämtliche Schallübertragungen von Raum zu Raum, d.h. neben dem direkt übertragenen Luft- und Trittschall ist auch der über flankierende Wände und Decken übertragene Schall zu berücksichtigen. Zahlenwerte als Auszug aus DIN 4109:1989-11 sind in Tabelle 2-22 dargestellt. Auf die Diskussion des Schallschutzes gegen Außenlärm sowie die Geräuscentwicklungen haustechnischer Anlagen wird hier und im Folgenden nicht weiter eingegangen. Im privatrechtlichen Vertragsverhältnis können auch Zielwerte für den Schallschutz vereinbart werden, die über den in DIN 4109 geforderten Schallschutz hinausgehen. Richtwerte für einen erhöhten Schallschutz können für den Wohnungsbau der VDI 4100 (VDI 4100, 2012) entnommen werden. Bei der Auslegung bestimmter Bauteile, wie z. B. Gebäudetrennwänden, ist zu beachten, dass die Rechtsprechung (siehe z.B. (BGH, 2007)) bei bestimmten Bauweisen bereits von einer geschuldeten Leistung ausgeht, die über dem bauaufsichtlich geforderten Schallschutzniveau der DIN 4109 liegt, siehe auch (DEGA, 2005). Für eine Planung des erhöhten Schallschutzes nach VDI 4100 ist allerdings zu beachten, dass die Planungswerte in der aktuellen Fassung dieser Richtlinie auf die nachhallzeitbezogenen Kenngrößen $D_{nT,w}$ (Standard-Schallpegeldifferenz) und $L'_{nT,w}$ (Standard-Trittschallpegel) umgestellt wurden, was einen direkten Abgleich erschwert, da die vor Ort vorliegenden geometrischen Randbedingungen (Raumvolumina, Trennbauteilfläche, Prüfrichtung) mit in die Betrachtung einfließen, siehe Tabelle 2-22 sowie Gleichungen (2-24) und (2-25).

Die Berechnung der bewerteten Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ aus dem bewerteten Bau-Schalldämm-Maß R'_w erfolgt nach Gleichung (2-24):

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot S_{Tr}}\right) \quad (2-26)$$

mit:

- $D_{nT,w}$ bewertete Standard-Schallpegeldifferenz in dB
- R'_w bewertetes Bau-Schalldämm-Maß in dB
- S_{Tr} Trennbauteilfläche
- T_0 Bezugs-Nachhallzeit = 0,5 s
- V Raumvolumen des Empfangsraums in m³

Die Berechnung des bewerteten Standard-Trittschallpegels $L'_{nT,w}$ aus dem bewerteten Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ erfolgt nach Gleichung (2-25):

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{0,16 \cdot V}{T_0 \cdot A_0}\right) \quad (2-27)$$

mit:

- $L'_{nT,w}$ bewerteter Standard-Trittschallpegel in dB
- $L'_{n,w}$ bewerteter Norm-Trittschallpegel in dB
- A_0 Bezugs-Absorptionsfläche = 10 m²
- T_0 Bezugs-Nachhallzeit = 0,5 s
- V Raumvolumen des Empfangsraums in m³

Tabelle 2-22: Anforderungen und Zielwerte für die Luft- und Trittschalldämmung von Innenbauteilen, exemplarisch für Wohnungstrennwände und -decken nach DIN 4109 (DIN 4109, 1989), sowie erhöhter Schallschutz nach VDI 4100 (VDI 4100, 2012)

Haustyp / Bauteil	Anforderungen nach DIN 4109	Schallschutz nach VDI 4100	
		Schallschutzstufe I	Schallschutzstufe II
Mehrfamilienhaus			
Luftschall Trennwand	$R'_w = 53$ dB	$D_{nT,w} \geq 56$ dB	$D_{nT,w} \geq 59$ dB
Luftschall Trenndecke	$R'_w = 54$ dB	$D_{nT,w} \geq 56$ dB	$D_{nT,w} \geq 59$ dB
Trittschall Trenndecke	$L'_{n,w} = 53$ dB	$L'_{nT,w} \leq 51$ dB	$L'_{nT,w} \leq 44$ dB
Doppel- oder Reihenhaus			
Luftschall Trennwand	$R'_w = 57$ dB	$D_{nT,w} \geq 65$ dB	$D_{nT,w} \geq 69$ dB
Trittschall Decke	$L'_{n,w} = 48$ dB	$L'_{nT,w} \leq 46$ dB	$L'_{nT,w} \leq 39$ dB

2.9.2 Nachweisverfahren

2.9.2.1 Allgemein

Die bauaufsichtlichen Nachweisverfahren für Bauprodukte und Bauarten sind für Deutschland in den LBO bzw. konkret für den Schallschutz in DIN 4109 geregelt. Prinzipiell kann man hier den Nachweis mittels Berechnung, Tabellenverfahren und/oder Messung führen. Welches der Nachweisverfahren angewendet wird hängt von dem speziellen Bauteil und der Bauart ab und soll im Folgenden näher diskutiert werden.

2.9.2.2 Vergleich zwischen neuer und alter DIN 4109

In diesem Abschnitt werden kurz die wesentlichen Unterschiede (aber auch auf die Gemeinsamkeiten) zwischen neuer und alter Norm behandelt.

Das Anforderungsniveau hat sich im Vergleich von alter zu neuer Norm nicht wesentlich geändert. Die Kenngrößen zur Festlegung der Anforderungen wurden gleichgehalten, d.h. das bewertete Bau-Schalldämm-Maß für den Luftschall und den bewerteten Norm-Trittschallpegel für den Trittschall. An einzelnen Stellen hat es Anpassungen mit Erhöhungen des Schallschutzniveaus gegeben, z.B. beim Schallschutz in Doppel- und Reihenhäusern, sowie bei der Trittschalldämmung. Hinsichtlich des Nachweisverfahrens ist beim Schallschutz im Massivbau ein neues Berechnungsverfahren eingeführt worden, das sich an den Regelungen der DIN EN 12354-1 (DIN EN 12354-1, 2000), -2 (DIN EN 12354-2, 2000) und -3 (DIN EN 12354-3, 2000) orientiert. Dies betrifft auch die Nachweisführung der Massivbauteile in einem in Hybridbauweise erstellten Gebäude. Siehe hierzu auch das Berechnungsbeispiel in Abschnitt 2.9.4 Beim Nachweisverfahren des Luftschallschutzes im Holzbau hat es keine wesentlichen Änderungen gegeben. Der Nachweis erfolgt in der Neufassung mit dem bewerteten Schalldämm-Maß und der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz die vom Zahlenwert identisch ist, mit dem bewerteten Labor-Schall-Längsdämm-Maß, das die Grundlage des Nachweisverfahrens nach der DIN 4109 aus 1989 bildete. Bei der Bestimmung der Trittschalldämmung von Holzdecken im Holzbau wurde ein neues Berechnungsverfahren eingeführt, das die Flankenschalldämmung bei Trittschallanregung mit einrechnet. Eine wesentliche Änderung in der neuen Norm betrifft das Sicherheitskonzept. In der DIN 4109 aus 1989 wurde ein Sicherheitsabschlag (das sogenannte Vorhaltemaß) an der Bauteilkenngröße vorgenommen. Die daraus resultierende Kenngröße für das Bauteil wurde als Rechenwert bezeichnet, z.B. für die Luftschalldämmung einer Wand oder Decke $R_{w,R} = R_w - 2 \text{ dB}$, mit dem Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes $R_{w,R}$ und R_w dem Laborprüfwert bzw. für die Flankenschalldämmung von Bauteilen $R_{L,w,R} = R_{L,w} - 2 \text{ dB}$, mit dem Rechenwert des bewerteten Schall-Längsdämm-Maßes $R_{L,w,R}$ und $R_{L,w}$ dem bewerteten Labor-Schall-Längsdämm-Maß. Im Unterschied hierzu wird in der neuen DIN 4109 die Prognoseberechnung, siehe Gleichungen (2-27) und (2-29), mit den Bauteilkennwerten ohne Sicherheitsabschlag / Vorhaltemaß durchgeführt und der Sicherheitsabschlag dann am Endergebnis des resultierenden R'_w eingerechnet.

2.9.2.3 Schalldämmung von Massivbauteilen

Die Luft- und Trittschalldämmung von Wänden und Decken wird in der Regel tabellarisch in Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse ermittelt. Die Vorschriften der neuen DIN 4109 sind so ausgelegt, dass die Kenngrößen R'_w und $L'_{n,w}$ direkt, das heißt inklusive der Flankenübertragungen ermittelt werden. Die Berechnung geht davon aus, dass die flächenbezogenen Massen der flankierenden Bauteile im Mittel 300 kg/m^2 beträgt und Abweichungen hiervon sowie die Anwesenheit von Vorsatzschalen über Zu- und Ab-

schläge beschrieben wird. Das Verfahren ist nicht geeignet für den Nachweis von Bauweisen in denen inhomogene Werkstoffe wie z.B. porosierte Ziegel (als Trenn- oder Flankenbauteil) eingesetzt werden.

Alternativ zu dem in DIN 4109 Beiblatt 1 beschriebenen Nachweisverfahren wurde ein europäisch harmonisiertes Berechnungsmodell in EN 12354-1 und -2 erarbeitet, das als Basis für die Neufassung der DIN 4109 dient und dessen Rechenregeln zum jetzigen Zeitpunkt in DIN 4109-2 (DIN 4109-2, 2016) zusammen mit DIN 4109-32 (DIN 4109-32, 2016) publiziert wurden. Bei diesem Rechenverfahren werden die Bauelemente (Wände, Decken als Trennbauteil oder flankierendes Bauteil, sowie die Stoßstelle zwischen Trennbauteil und Flankenbauteil) separat betrachtet und jedem Bauteil individuell eine Kenngröße zugeordnet. Für das Bauteil Wand und Decke wird deren Luftschalldämmung durch das bewertete Schalldämm-Maß R_w als Laborprüfgröße ohne Flankenübertragung gekennzeichnet. Die Trittschalldämmung der Decke wird über den bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ (ebenfalls als Laborprüfgröße ohne Flankenübertragung) beschrieben. Für die Beschreibung der Stoßstelle zwischen Trennbauteil und flankierendem Bauteil wurde das Stoßstellendämm-Maß K_{ij} eingeführt. Für den Nachweis des Luftschallschutzes werden aus den Eigenschaften der einzelnen Komponenten die bewerteten Flankendämm-Maße $R_{ij,w}$ berechnet die wiederum zur Prognose des resultierenden Schallschutz in Form des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes R'_w verwendet werden, siehe Gleichungen (2-26) und (2-27).

Die Eingangsgrößen für das bewertete Schalldämm-Maß und das Stoßstellendämm-Maß werden rechnerisch in Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse der Bauteile ermittelt. In besonderen Fällen (z.B. bei porosierten Ziegeln) kann es auch erforderlich werden die Kenngrößen über Schallmessungen im Laborprüfstand nach den Normenreihen EN ISO 10140 (DIN EN ISO 10140, 2010) und/oder EN ISO 10848 (DIN EN ISO 10848, 2006) zusammen mit EN ISO 717 (DIN EN ISO 717, 2013) zu ermitteln.

Berechnung des bewerteten Flankendämm-Maßes $R_{ij,w}$ nach DIN 4109-2 (Sonderfall ohne Vorsatzschale):

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w}}{2} + \frac{R_{j,w}}{2} + K_{ij} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{S_{Tr}}{l_{ij} \cdot 1m}\right) \quad (2-28)$$

mit:

- l_{ij} Kantenlänge zwischen Bauteil i und Bauteil j
- K_{ij} Stoßstellendämm-Maß zwischen Bauteil i und Bauteil j
- $R_{i,w}, R_{j,w}$ bewertete Schalldämm-Maße von Bauteil i und Bauteil j
- S_{Tr} Trennbauteilfläche

Berechnung des bewerteten Bau-Schalldämm-Maßes eines Trennbauteils inklusive Nebenwege R'_w aus bewertetem Schalldämm-Maß R_w und bewerteten Flankendämm-Maß $R_{ij,w}$ bei Berücksichtigung aller Nebenwege F_f, F_d und D_f , siehe z.B. Abbildung 2-41.

$$R'_w = -10 \cdot \text{Log}\left(10^{-0,1R_w} + \sum_{ij=F_f, F_d, D_f} 10^{-0,1R_{ij,w}}\right) \quad (2-29)$$

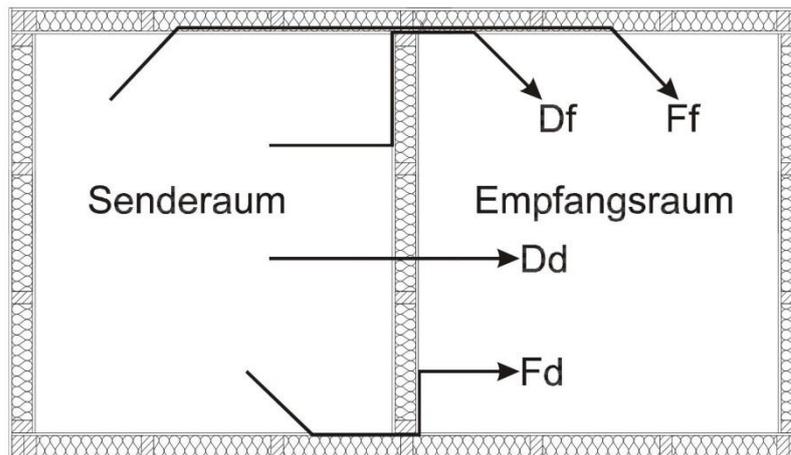


Abbildung 2-41: Schalldämmung einer Trennwand, Darstellung der Schallübertragungswege, direkt D_d und über flankierende Bauteile D_f , F_d und F_f bei Luftschall-Anregung (Eigene Darstellung)

Die Trittschalldämmung von Massivdecken wird nach DIN 4109-2 aus dem äquivalenten bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w,eq}$ der Rohdecke und der bewerteten Trittschallminderung ΔL_w der Deckenauflage berechnet. Effekte durch Flankenübertragung werden durch einen Korrektursummanden K beschrieben, dessen Werte in Abhängigkeit der flächenbezogenen Massen von Decke und Wand tabellarisch angegeben sind. Die Werte werden zunächst für Trittschallübertragungen von oben nach unten berechnet. Für davon abweichende Übertragungsrichtungen und Raumanordnungen werden Korrekturwerte K_T angesetzt.

Die Berechnung des bewerteten Norm-Trittschallpegels inkl. Flankenübertragung einer Massivdecke nach DIN 4109-2 erfolgt mit Gleichung (2-28):

$$L'_{n,w} = L_{n,w,eq} - \Delta L_w + K - K_T \quad (2-30)$$

Der äquivalente bewertete Norm-Trittschallpegel wird rechnerisch in Abhängigkeit der flächenbezogenen Masse des Bauteils ermittelt. Die bewertete Trittschallminderung kann abhängig von Estrichplatte und dynamischer Steifigkeit der Trittschalldämmplatte einem Diagramm in DIN 4109-34 (DIN 4109-34, 2016) entnommen werden.

Generell gilt im Massivbau, dass die Schalldämmung von Bauteilen auch sehr stark von der Schallableitung in den angrenzenden Baukörper abhängt. Dieser kann rechnerisch bzw. messtechnisch über den Verlustfaktor η beschrieben werden. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird im Nachweisverfahren der neuen DIN 4109 auf einen mittleren Bauverlustfaktor $\eta_{\text{Bau,ref}}$ bezogen. Von üblichen Massivbaubedingungen wird ausgegangen wenn das Trennbauteil an mindestens drei Kanten starr mit anderen massiven Bauteilen verbunden ist.

2.9.2.4 Schalldämmung von Holzbauteilen

Für das Nachweisverfahren der Luft- und Trittschalldämmung von Wänden und Decken in Holz- oder Skelettbauweise können die Berechnungsmodelle des Massivbaus nicht herangezogen werden. Wie im Massivbau muss aber auch beim Holzbau die Flankenschallübertragung bei der Prognose des Schallschutzes mitbeachtet werden. Im Gegensatz zum Massivbau ist hier aber nur der Flankenübertragungsweg F_f zu berücksichtigen. Damit vereinfacht sich Gleichung (2-27) zu Gleichung (2-29) für den reinen Holzbau. Die Schallübertragung über den Flankenübertragungsweg F_f wird durch das bewertete Flankendämm-Maß

$R_{Ff,w}$ beschrieben, welches wiederum aus der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ abgeleitet werden kann.

Die Eingangsgrößen für die Prognose des Schallschutzes sind im Holz- und Leichtbau das bewertete Schalldämm-Maß R_w des Trennbauteils (als Laborprüfgröße) sowie für alle Flankenschallübertragungswege die bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$. Diese Größen können entweder der Beispielsammlung DIN 4109-33 (DIN 4109-33, 2016) (bisher DIN 4109 Beiblatt 1 (DIN 4109, 1989)) entnommen oder messtechnisch nach EN ISO 10140 bzw. EN ISO 10848 bestimmt werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass DIN 4109 Beiblatt 1 aus dem Jahr 1989 datiert und damit nicht mehr notwendigerweise den Stand der Technik hinsichtlich der heute gebauten Holzbauteile darstellt.

Für den Einsatz im Holzbau ist Gleichung (2-27) nachfolgend angegeben:

$$R'_w = -10 \cdot \text{Log} \left(10^{-0,1 \cdot R_{Dd,w}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-0,1 \cdot R_{Ff,w}} \right) \quad (2-31)$$

mit:

- R'_w Bewertetes Schalldämm-Maß der Trennwand inklusive Nebenwege F_f
- R_w Bewertetes Schalldämm-Maß der Trennwand ohne Nebenwege
- $R_{Ff,w}$ Bewertetes Flankendämm-Maß für Übertragungsweg F_f

Die Umrechnung der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ in ein bewertetes Flankendämm-Maß $R_{Ff,w}$ lautet:

$$R_{Ff,w} = D_{nf,w} + 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{l_0}{l} \right) + 10 \cdot \text{Log} \left(\frac{S_{Tr}}{A_0} \right) \quad (2-32)$$

Für den Nachweis der Trittschalldämmung von Holzdecken wird nach DIN 4109:1989 und auch nach der neuen DIN 4109-2 der bewertete Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ der gesamten Deckenkonstruktion inklusive Deckenauflage herangezogen. Ein separates Einrechnen der bewerteten Trittschallminderung von Deckenauflagen ist hier nicht vorgesehen. Im Rahmen der Neufassung der DIN 4109 wird die Übertragung auf die Bausituation durch Effekte der Flankenübertragung durch Korrektursummanden K_1 (Schallübertragungsweg D_f) und K_2 (Schallübertragungsweg DF_f) beschrieben, siehe Abbildung 2-42. Die Zahlenwerte von K_1 und K_2 sind in Abhängigkeit der konstruktiven Details von Decke und Wand tabellarisch angegeben. Der bewertete Norm-Trittschallpegel inklusive der Flankenübertragung wird dann nach Gleichung (2-31) berechnet. Die Trittschalldämmung der reinen Deckenkonstruktion kann entweder der Beispielsammlung DIN 4109 Beiblatt 1 oder für die Zukunft DIN 4109-33 entnommen oder messtechnisch nach DIN EN ISO 10140 bestimmt werden. DIN 4109 (DIN 4109, 1989) lässt für den objektbezogenen Nachweis auch projektbezogene Schalldämmprüfungen am Bau nach EN ISO 16283-2 (EN ISO 16283-2, 2016) zu.

Die Berechnung des bewerteten Norm-Trittschallpegels einer Holzdecke nach DIN 4109-2 (DIN 4109-2, 2016) lautet:

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K_1 + K_2 \quad (2-33)$$

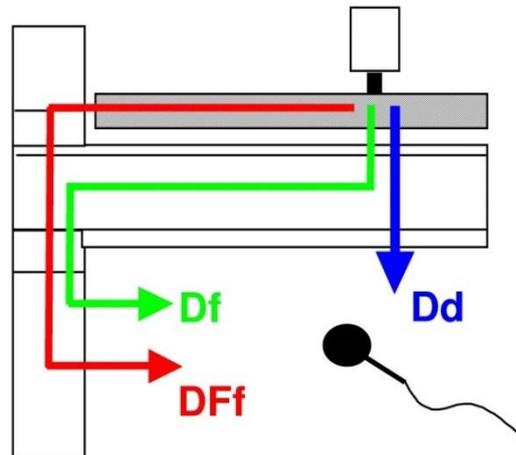


Abbildung 2-42: Schematische Darstellung der Beiträge zur Trittschallübertragung im Holzbau: direkt übertragener Trittschall (Weg Dd) und Beiträge der Flankenübertragung auf den Übertragungswegen Df und DFf (Eigene Darstellung)

2.9.3 Schallschutz von Hybridbauweisen

Rechenregeln für den Nachweis des Luftschallschutzes von Mischbauweisen bzw. Skelettbau wurden schon in DIN 4109 Beiblatt 1 niedergelegt. Sie orientieren sich an den Berechnungsregeln für den Holzbau, wobei die Luft- und Flankenschalldämmung der schweren, massiven Komponenten abhängig von deren flächenbezogener Masse beurteilt wird. Auch für die neue DIN 4109 ist nach derzeitigem Stand vorgesehen die Luftschalldämmung zwischen Räumen aus dem direkt übertragenen Luftschall und den Beiträgen der Flankenschallübertragung zu berechnen. Die Flankenschallübertragung über massive Bauteile folgt den Rechenregeln des Massivbaus (mit gewissen Sonderregeln für Stoßstellen zu leichten Bauteilen). Für die Flankenschalldämmung von leichten Bauteilen wird wiederum die bewertete Norm-Flankenpegeldifferenz herangezogen.

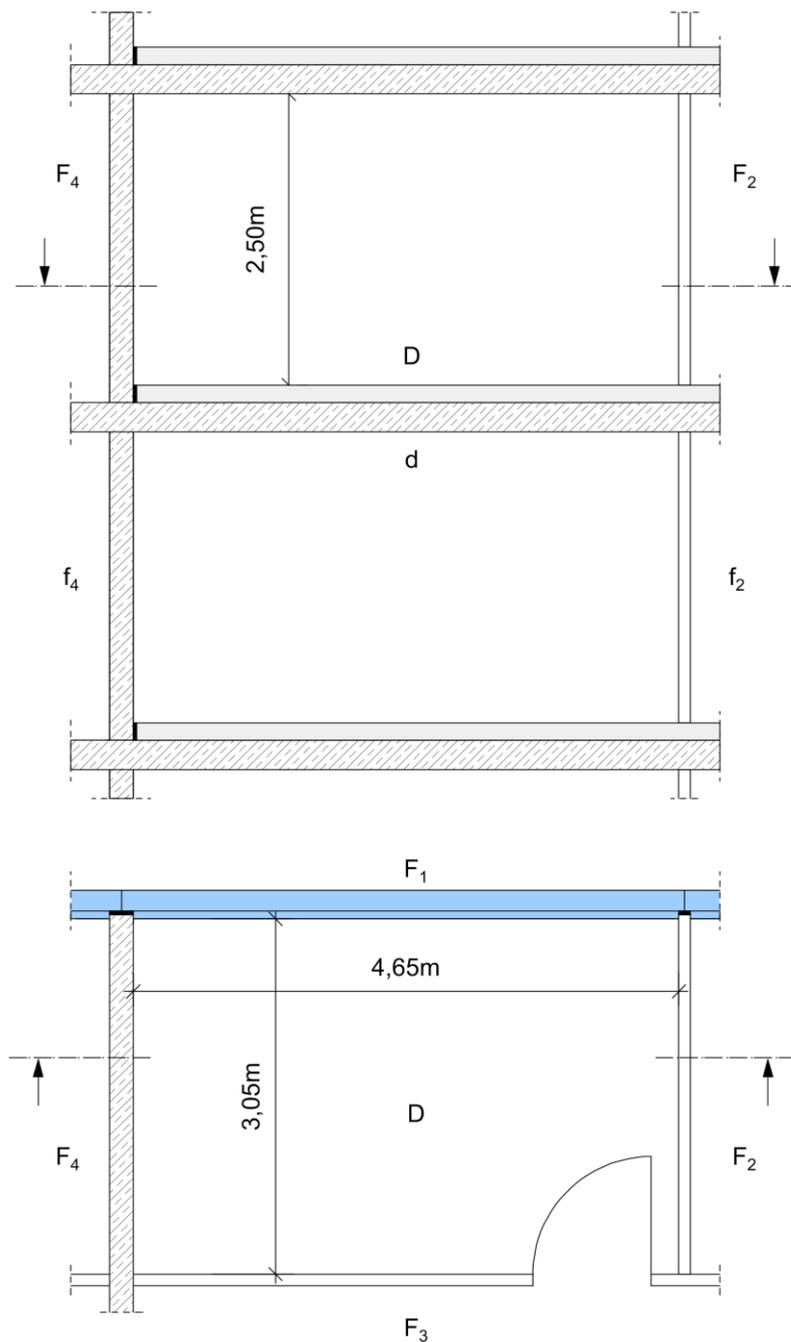
Eingangsgrößen für die Berechnung können den Beispielsammlungen DIN 4109 Beiblatt 1 bzw. DIN 4109-32 und -33 entnommen werden, wobei Kenngrößen für Flankenschalldämmung und Stoßstellen zwischen leichten und schweren Bauteilen nur in Einzelfällen vorliegen, siehe z.B. (Teibinger, M.; Müllner, H., 2005). Alternativ können natürlich auch hier wieder messtechnische Nachweise entsprechend EN ISO 10140 oder EN ISO 10848 herangezogen werden.

2.9.4 Berechnungsbeispiel

2.9.4.1 Grundlagen

Im nachfolgenden Beispiel wird der Schallschutz zwischen zwei unmittelbar übereinander liegenden Büroräumen berechnet. Die Berechnungen und Beurteilungen orientieren sich an den Vorgaben aus der Neufassung der DIN 4109 (alle Teile aus 2016).

Bei dem Beispiel eines Gebäudes in Hybridbauweise sind die Decke als massive Stahlbetondecke, die Innenwände in Metallständerbauweise mit GKB-Platten und die Fassade als vorgehängte Holzständerwand ausgeführt. Der Grundriss und Schnitt der betrachteten Räume entsprechen Abbildung 2-43, wobei eine flankierende massive Stahlbetonwand ausgeführt wurde. Die Bauteilaufbauten sind nachfolgend beschrieben.



D	Trennbauteil senderaumseitig	F ₃	Flankenbauteil 3 senderaumseitig
d	Trennbauteil empfangsraumseitig	F ₄	Flankenbauteil 4 senderaumseitig
F ₁	Flankenbauteil 1 senderaumseitig	f ₂	Flankenbauteil 2 empfangsraumseitig
F ₂	Flankenbauteil 2 senderaumseitig	f ₄	Flankenbauteil 4 empfangsraumseitig

Abbildung 2-43: Grundriss und Längsschnitt von zwei übereinanderliegenden Räumen im Skelettbau (Eigene Darstellung)

2.9.4.2 Bauteilbeschreibung

Trennendes Bauteil

- Dd Stahlbetontrenndecke $S_S = 3,05 \text{ m} \times 4,65 \text{ m} = 14,18 \text{ m}^2$;
 240 mm Stahlbeton Verbundestrich:
 $m'_{\text{Rohdecke}} = 0,24 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 + 0,04 \text{ m} \times 2350 \text{ kg/m}^3 = 670 \text{ kg/m}^2$;
 bewertetes Schalldämm-Maß $R_w = 30,9 \log(670) - 22,2 \text{ dB} = 65,1 \text{ dB}$
 (nach DIN 4109-3-2, Kapitel 4.1.4.2.2, Gleichung (13) (DIN 4109-3-2, 2016))

Die Trenndecke bildet mit der Stahlbetonwand einen T-Stoß, die Holzständerwand läuft vor der Decke durch (sie ist raumseitig mit einer Vorsatzschale verkleidet), und die Gipskartonständerwände stehen übereinander auf dem Verbundestrich.

Flankierende Bauteile (im Sende- und Empfangsraum identisch)

- F₁ f₁ Holzständerwand mit raumseitiger Vorsatzschale
 mit einer bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz von $D_{n,f,w} = 65 \text{ dB}$
 entsprechend Ergebnis Forschungsvorhaben, bei $l_{\text{lab}} = 4,5 \text{ m}$
- F₂ f₂ Innenwand
 100 mm Gipskartonständerwand, doppelt beplankt, Typ CW 50 × 0,6 mit 40 mm Faserdämmstoff
 im Hohlraum mit einer bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz von $D_{n,f,w} = 76 \text{ dB}$
 (DIN 4109-3-3, Kapitel 5.1.2.2 (DIN 4109-3-3, 2016), bei $l_{\text{lab}} = 4,5 \text{ m}$)
- F₃ f₃ Flurwand
 wie Innenwand
- F₄ f₄ Stahlbetonwand
 200 mm Stahlbeton (Sichtbeton) $m' = 0,20 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 480 \text{ kg/m}^2$
 (nach DIN 4109-3-2, Kapitel 4.1.4.1.1)
 bewertetes Schalldämm-Maß $R_w = 30,9 \log(480) - 22,2 \text{ dB} = 60,7 \text{ dB}$
 (nach DIN 4109-3-2, Kapitel 4.1.4.2.2)

2.9.4.3 Berechnung

Im Skelettbau wird die Schallübertragung über die massiven Bauteile entsprechend (2-26) berechnet:

$$R_{ij,w} = \frac{R_{i,w}}{2} + \frac{R_{j,w}}{2} + \Delta R_{ij,w} + K_{ij} + 10 \lg \frac{S_S}{l_0 \cdot l_f}$$

$$\Delta R_{ij,w} = 0 \text{ dB (da keine Vorsatzschale vor massivem Bauteil vorhanden)}$$

Für K_{ij} erfolgt die Berechnung nach DIN 4109-3-2, Kapitel 5.2.4.1.4 (DIN 4109-3-2, 2016) für einen T-Stoß aus dem Verhältnis der flächenbezogenen Massen des Trennbauteils (Decke $m'_i = 670 \text{ kg/m}^2$) und des Flankenbauteils (Stahlbetonwand $m'_j = 480 \text{ kg/m}^2$) mit $M = \log(670/480) = 0,145$.

Daraus ergeben sich dann die Stoßstellendämm-Maße zu:

$$K_{Fd} = K_{Df} = 4,7 + 5,7 \times M^2 = 4,8 \text{ dB};$$

$$K_{Ff} = 5,7 + 14,1 M + 5,7M^2 = 7,9 \text{ dB}.$$

Die gemeinsame Kantenlänge zwischen Trenndecke und Flanke 4 (Stahlbetonwand) beträgt $l_{f4} = 3,05 \text{ m}$. Die Schallübertragung über die Außenfassade wird entsprechend den Vorgaben für den Leichtbau nach Gleichung (2-32) berechnet:

$$R_{Ff,w} = D_{n,f,w} + 10 \lg \frac{I_{lab}}{I_f} + 10 \lg \frac{S_s}{A_0} \quad (2-34)$$

Tabelle 2-23: Berechnung der bewerteten Direkt- und Flankenschalldämm-Maße $R_{ij,w}$ für die Übertragung über die Massivbauteile (oben Decke und Stahlbetonwand) und für die Übertragung über die Leichtbauteile (unten) mit den entsprechenden Eingangsdaten

Bauteil	Übertragungsweg	$R_{i,w} / 2$ dB	$R_{j,w} / 2$ dB	K_{ij} dB	$10 \lg(S/I)$ dB	ΔR_w dB	$R_{ij,w}$ dB
Decke	R_{Dd}	65,1 / 2	65,1 / 2	—	—	0,0	65,1
Stahlbetonwand	$R_{Df,4}$	65,1 / 2	60,7 / 2	4,8	6,7	0,0	74,4
Stahlbetonwand	$R_{Fd,4}$	60,7 / 2	65,1 / 2	4,8	6,7	0,0	74,4
Stahlbetonwand	$R_{Ff,4}$	60,7 / 2	60,7 / 2	7,9	6,7	0,0	75,3
		$D_{n,f,w}$ dB		$10 \lg(S_S/A_0)$ dB	$10 \lg(I_{lab}/I_f)$ dB		$R_{Ff,w}$ dB
Außenwand	$R_{Ff,1}$	65		1,5	-0,1		66,4
Innenwand	$R_{Ff,2}$	76		1,5	1,7		79,2
Flurwand	$R_{Ff,3}$	76		1,5	-0,1		77,4

Das resultierende bewertete Schalldämm-Maß R'_w wird nach Gleichung (2-27) berechnet, indem die Werte der letzten Spalte von Tabelle 2-23 in diese Gleichung eingesetzt werden.

$$R'_w = -10 \lg \left[10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-R_{Ff,w}/10} + \sum_{f=1}^n 10^{-R_{Df,w}/10} + \sum_{F=1}^n 10^{-R_{Fd,w}/10} \right] \quad (2-35)$$

Das resultierende bewertete Schalldämm-Maß R'_w der Trenndecke ergibt sich zu:

$$R'_w = 61,9 \text{ dB}.$$

Nach Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwerts (vereinfachte Ermittlung nach DIN 4109-2, Abschnitt 5.3.3, Abzug von 2 dB) kann das Ergebnis gemäß DIN 4109-2, Gleichung (49) (DIN 4109-2, 2016)

$$R'_w - 2 \text{ dB} \geq \text{erf. } R'_w \text{ [dB]}$$

mit dem Anforderungswert aus DIN 4109-1, Tabelle 2, Zeile 2, Spalte 3 (DIN 4109-1, 2016) (erf. $R'_w \geq 54 \text{ dB}$ für eine Mietbereichstrennung) verglichen werden. Es gilt

$$(61,9 - 2) \text{ dB} = 59,9 \text{ dB} \geq 54 \text{ dB},$$

so dass die Anforderung erfüllt wird.

2.9.4.4 Anmerkung

Falls zur Beurteilung des Schallschutzes die bewertete Standard-Schallpegeldifferenz $D_{nT,w}$ berechnet werden soll, geschieht das mit Hilfe von Gleichung (B.1) aus DIN 4109-2 (DIN 4109-2, 2016). Damit ergibt sich

$$D_{nT,w} = 61,9 \text{ dB} + 10 \log (0,32 \times 2,5) \text{ dB} = 60,9 \text{ dB}$$

Dieser Wert kann dann nach Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwerts (vereinfachtes Verfahren mit Abzug von 2 dB) mit dem vereinbarten Anforderungswert erf. $D_{nT,w}$ z.B. aus VDI 4100 verglichen werden. Dafür gilt der Zusammenhang in Gleichung (B.9), aus DIN 4109-2 (DIN 4109-2, 2016).

2.10 Holzschutz

2.10.1 Grundlage

Eine lange Gebrauchsdauer der Holzfassaden und -bauteile wird wesentlich durch die Einhaltung der Anforderungen des Holzschutzes gewährleistet. Den aktuellen Stand der normativen Holzschutzregelung bildet die seit Februar 2012 vollständig überarbeitete Normenreihe DIN 68800. Mit der Überarbeitung der Holzschutznorm begibt sich Deutschland auf einen Weg, dem viele europäische Staaten nicht folgen wollen. Nach aktuellem Stand ist auf europäischer Ebene keine normative Regelung für den konstruktiven Holzschutz vorhanden.

In diesem Kapitel soll die aktuelle Fassung der deutschen Norm in ihren Grundzügen dargestellt und die sich daraus ergebenden Randbedingungen für nichttragende Fassadenelemente in Holzrahmenbauweise zusammengefasst werden. Die Zusammenfassung bezieht sich auf die Holzschutznormen DIN 68800-1 (DIN 68800-1, 2011), DIN 68800-2 (DIN 68800-2, 2012) und DIN 68800-3 (DIN 68800-3, 2012). Der Aspekt des chemischen Holzschutzes gemäß DIN 68800-3 wird hinten angestellt, mit der Begründung, dass auch für Holzfassadenelemente der konstruktive dem chemischen Holzschutz vorzuziehen ist.

In DIN 68800-1 werden Begrifflichkeiten erläutert sowie allgemeine Grundlagen und Ausführungsbestimmungen geregelt. Dabei legt sie dar, dass auch für nichttragende Bauteile geeignete Maßnahmen gegen holzerstörende Organismen für die vorgesehene Gebrauchsdauer vorgenommen werden sollten (DIN 68800-1, 2011, Kapitel 7.1.2). In Verbindung mit der Gebrauchsdauer eines Bauwerks stehen Lebenszyklusanalysen, welche in Kapitel 2.12 dieses Berichts näher aufgezeigt werden. Als holzerstörende Organismen werden laut Norm holzerstörende Pilze, holzerstörende Insekten und Holzschädlinge im Meerwasser bezeichnet. Hinweise für die Planung von Holzschutzmaßnahmen für nichttragende Bauteile geben an, dass mit steigender Gefährdung und höheren Anforderungen an das Holzbauteil vorbeugende Holzschutzmaßnahmen an Bedeutung zunehmen. (DIN 68800-1, 2011, Kapitel E.1.2) Demnach können für nichttragende Bauteile die aufgezeigten Maßnahmen zum Schutz des Holzes für tragende Bauteile sinngemäß angewendet werden. (DIN 68800-1, 2011, Kapitel E.2.2)

Die Einstufung von Bauteilen in Gebrauchsklassen (frühere Gefährdungsklassen) dient zur Widerspiegelung einer möglichen Gefahr durch holzschädigende Organismen im Laufe der Gebrauchsdauer und in Abhängigkeit der Einbausituation. Als holzschädigende Organismen werden laut Norm neben den oben aufgeführten holzerstörenden Organismen holzverfärbende Pilze und Schimmelpilze mit aufgeführt. Die Holzfeuchte des Gebrauchszustandes sowie allgemeine Gebrauchsbedingungen entscheiden über die Zuordnung zu einer Gebrauchsklasse. Die Abbildung 2-44 gibt einen vereinfachten Überblick über den Entscheidungsablauf für die Zuordnung von Holzbauteilen zu einer Gebrauchsklasse.

Die Aufteilung der nichttragenden Fassadenelemente in die Bereiche Fassade, Kernelement sowie Installationsebene führt von innen nach außen zu einer erhöhten Gefahr einer Durchfeuchtung und aufgrund dessen zu einer unterschiedlichen Einteilung der Systembereiche in Gebrauchsklassen. Der Bereich der Installationsebene wird im weiteren Verlauf vernachlässigt, da ihr Vorhandensein nicht zwingend ist bzw. ihre Anforderungen denen des Kernelements ähneln würden. Die Abbildung 2-45 verdeutlicht die Zuordnung von Holzbauteilen bzw. Systembereichen zu einer Gebrauchsklasse.

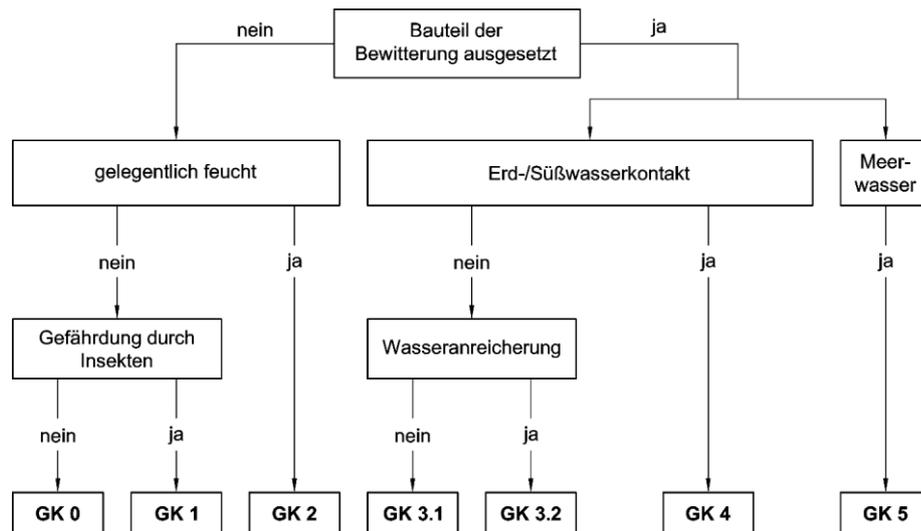


Abbildung 2-44: Vereinfachte Entscheidungsabfolge zur Zuordnung von Holzbauteilen zu einer Gebrauchsklasse (DIN 68800-1, 2011)

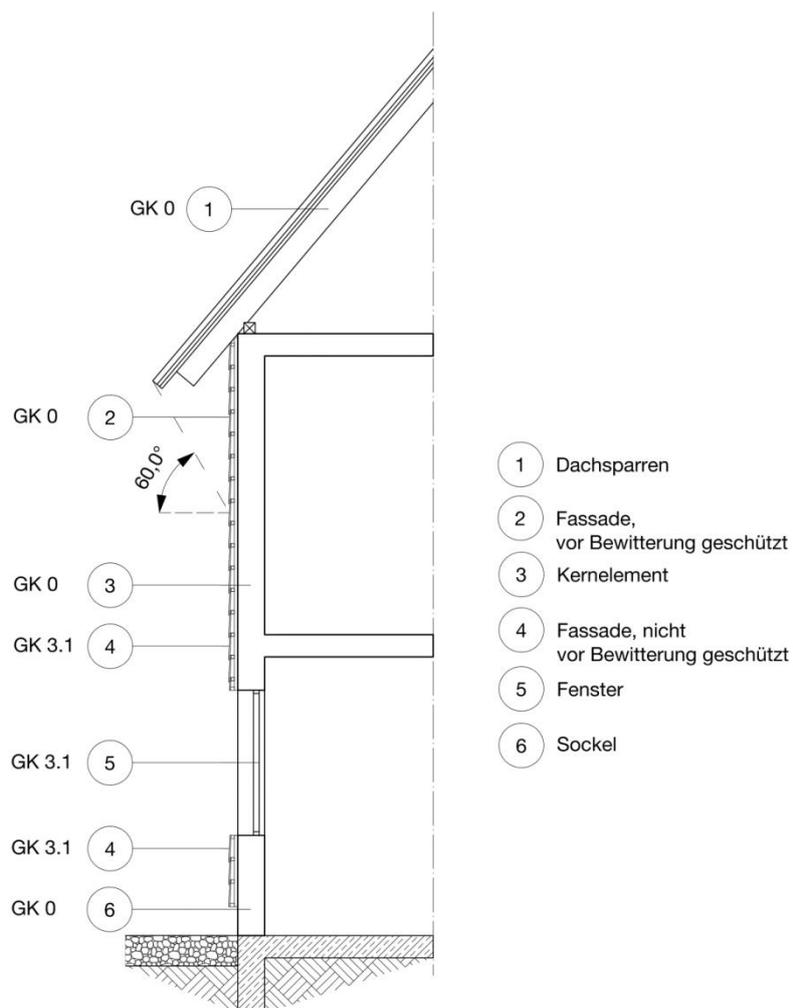


Abbildung 2-45: Zuordnung von Holzbauteilen bzw. Systembereiche des Fassadenelements zu einer Gebrauchsklasse (Eigene Darstellung)

2.10.2 Kernelement

Aus Abbildung 2-44 bzw. Abbildung 2-45 wird ersichtlich, dass das Kernelement eines Fassadenelements, sprich der Systembereich, der aufgrund eines Wetterschutzes durch eine Fassade nicht der Bewitterung ausgesetzt ist, der Gebrauchsklasse GK 0 oder GK 1 zugeordnet werden kann. Gebrauchsklasse GK 2 würde bereits eine erhöhte Gefahr durch unzuträgliche Veränderung der Holzfeuchte darstellen. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick der Gebrauchsklassen GK 0 bis GK 1 gemäß DIN 68800-1.

Tabelle 2-24: Auszug aus DIN 68800-1 zur Darstellung der Aufteilung in Gebrauchsklassen GK 0 bis GK 1 in Abhängigkeit von Holzfeuchte, allgemeinen Gebrauchsbedingungen und Gefährdungen durch holzschädigende Organismen (DIN 68800-1, 2011, Tabelle 1)

GK	Holzfeuchte / Exposition	Allgemeine Gebrauchsbedingungen	Gefährdung durch				Auswaschbeanspruchung
			Insekten	Pilze	Moderfäule	Holzschädlinge im Meerwasser	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	trocken (ständig ≤ 20 %) mittlere relative Luftfeuchte bis 85 %	Holz oder Holzprodukt unter Dach, nicht der Bewitterung und keiner Befeuchtung ausgesetzt, die Gefahr von Bauschäden durch Insekten kann ausgeschlossen werden	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
1	trocken (ständig ≤ 20 %) mittlere relative Luftfeuchte bis 85 %	Holz oder Holzprodukt unter Dach, nicht der Bewitterung und keiner Befeuchtung ausgesetzt	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein

Gebrauchsklasse GK 0 beschreibt einen geschützten Einbauzustand, bei dem im Vergleich zur Gebrauchsklasse GK 1 das Risiko von Bauschäden durch Insekten vermieden wird. Der Einsatz von technisch getrocknetem Bauholz wäre hierbei eine zu berücksichtigende Bedingung. Um die Funktionalität der Holzrahmenbauelemente zu gewährleisten, ist die Einhaltung aller Bedingungen für GK 0 einzuhalten.

2.10.3 Fassade

Das Kernelement wird nach außen durch Fassadenbekleidungen oder Vorsatzschalen gegen Wettereinflüsse geschützt. In Abbildung 2-44 bzw. Abbildung 2-45 wird ersichtlich, dass direkt bewitterte Fassaden bis zur Gebrauchsklasse 3.1 zugeordnet werden können. Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick der Gebrauchsklassen GK 2 bis GK 3 gemäß DIN 68800-1.

Tabelle 2-25: Auszug aus DIN 68800-1 zur Darstellung der Aufteilung in Gebrauchsklassen GK 2 – GK 3 in Abhängigkeit von Holzfeuchte, allgemeinen Gebrauchsbedingungen und Gefährdungen durch holzschädigende Organismen (DIN 68800-1, 2011, Tabelle 1)

GK	Holzfeuchte / Exposition	Allgemeine Gebrauchsbedingungen	Gefährdung durch				
			Insekten	Pilze	Moderfäule	Holzschädlinge im Meerwasser	Auswaschbeanspruchung
1	2	3	4	5	6	7	8
2	Gelegentlich feucht (> 20 %) mittlere relative Luftfeuchte über 85 % oder zeitweise Befeuchtung durch Kondensation	Holz oder Holzprodukt unter Dach, nicht der Bewitterung ausgesetzt, eine hohe Umgebungsfeuchte kann zu gelegentlicher, aber nicht dauernder Befeuchtung führen	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
3.1	Gelegentlich feucht (> 20 %) Anreicherung von Wasser im Holz, auch räumlich begrenzt, nicht zu erwarten	Holz oder Holzprodukt nicht unter Dach, mit Bewitterung, aber ohne ständigen Erd- oder Wasserkontakt, Anreicherung von Wasser im Holz, auch räumlich begrenzt, ist aufgrund von rascher Rücktrocknung nicht zu erwarten	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja
3.2	Häufig feucht (> 20 %) Anreicherung von Wasser im Holz, auch räumlich begrenzt, zu erwarten	Holz oder Holzprodukt nicht unter Dach, mit Bewitterung, aber ohne ständigen Erd- oder Wasserkontakt, Anreicherung von Wasser im Holz, auch räumlich begrenzt, zu erwarten	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja

DIN 68800-1 kann entnommen werden, dass Gebrauchsklasse GK 3 auf Holzbauteile, welche sich nicht unter einem Dach befinden und keinen ständigen Erd- oder Wasserkontakt haben, angewendet wird. (DIN 68800-1, 2011, Kapitel 5.2.2.1) Eine Unterscheidung in GK 3.1 und GK 3.2 erfolgt je nach Gefahr der Anreicherung von Wasser. In Gebrauchsklasse GK 3.1 ist eine Anreicherung von Wasser aufgrund einer raschen Rücktrocknung, z.B. gute Belüftung, oder durch geeignete Maßnahmen, z. B. intakte Beschichtung, nicht zu erwarten.

Eine Einstufung in eine niedrigere Gebrauchsklasse ist nicht durchführbar, da ein erforderlicher Dachüberstand im mehrgeschossigen Holzbau nicht eingehalten werden kann. Ein ausreichender Dachüberstand ist gegeben, wenn zwischen Unterkante Dach und Unterkante Holz ein Winkel von mindestens 60° bezogen auf die Horizontale vorhanden ist. Dieser Winkel entspricht einem möglichen Einfallswinkel von Schlagregen.

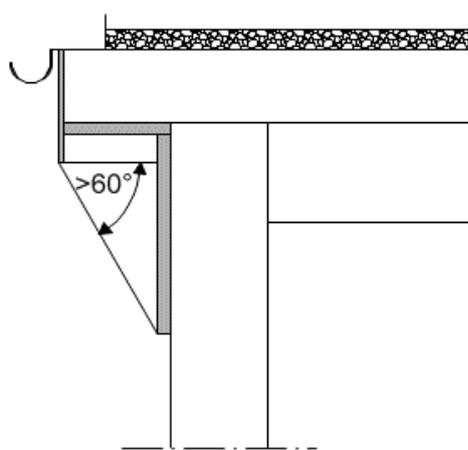


Abbildung 2-46: Erforderlicher Dachüberstand (Eigene Darstellung)

Daher sind Niederschläge von „Nicht unter Dach“-Fassadenelementen und deren Anschlussbereichen durch einen dauerhaft wirksamen Wetterschutz fernzuhalten (siehe Kapitel 2.10.6) oder sie sind so schnell abzuleiten, dass keine unzuträgliche Veränderung des Feuchtegehaltes eintritt. Dasselbe gilt für Niederschlägen ausgesetzte Holzwerkstoffe, die ebenfalls mit einem dauerhaft wirksamen Wetterschutz zu versehen sind. Ausnahmen bilden hinterlüftete Fassadenbekleidungen, z.B. aus Furnierschichtholz, Sperrholz, Massivholzplatten oder zementgebundenen Spanplatten, welche bauaufsichtliche Verwendbarkeitsnachweise für den vorgesehenen Verwendungszweck benötigen. (DIN 68800-2, 2012, Kapitel 5.2.1.1)

Hinterlüftete sowie nicht hinterlüftete Fassaden werden unter Kapitel 2.2.4.3 vorgestellt. Eine hinterlüftete Außenwandbekleidung stellt einen dauerhaft wirksamen Wetterschutz auf der Grundlage bestimmter Konstruktionsbedingungen dar, welche in Kapitel 2.10.6 in Abbildung 2-48 dargestellt sind. Im Falle einer hinterlüfteten Fassade sollte die Lattung vertikal verlaufen und eine Luftschicht von mindestens 20 mm zwischen Bekleidung und Kernelement aufweisen. Es sind Anforderungen an Be- und Entlüftungsöffnungen einzuhalten mit Querschnittsflächen von jeweils mindestens 50 cm² je 1 m Wandlänge. Alternativ kann jedoch eine waagerechte Lattung mit Konterlattung angebracht werden. In diesem Fall sind Belüftungsöffnungen unten anzuordnen und Querschnittsflächen von mindestens 100 cm² je 1 m Wandlänge einzuhalten. Bei kleinformatischen Außenwandbekleidungen, beispielsweise Brettern und Schindeln, ist eine wasserableitende Schicht aus Unterdeckplatten oder Unterdeckbahnen wandseitig der Lattung anzuordnen. Latte der hinterlüfteten Fassaden werden daraufhin der Gebrauchsklasse GK 0 zugeordnet. Für eine nicht hinterlüftete Fassade mit WDVS oder Putzträgerplatten ist die Verwendbarkeit durch einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis nachzuweisen. (DIN 68800-2, 2012)

2.10.4 Vorbeugende Maßnahmen zum Schutz des Holzes

Eine ausreichende Gebrauchsdauer kann gewährleistet werden, sofern rechtzeitig erforderliche Schutzmaßnahmen je nach Gebrauchsklasse definiert sind. Maßnahmen des konstruktiven Holzschutzes werden gemäß DIN 68800-2 geregelt. Darunter fallen alle planerischen, konstruktiven und organisatorischen Maßnahmen, welche vor einer Minderung der Funktionstüchtigkeit schützen, einem Angriff durch holzschädigende Organismen entgegenwirken und Schäden durch Quellen und Schwinden vermeiden. Insgesamt wird unterschieden zwischen grundsätzlichen baulichen Maßnahmen, welche auf jeden Fall anzuwenden sind, und besonderen baulichen Maßnahmen. Ziel hierbei ist es die Holzfeuchte eines Bauteils spätestens durch Einsatz besonderer baulicher Maßnahmen soweit zu verringern, sodass nach Zuordnung von

DIN 68800-1 Gebrauchsklasse GK 0 eingehalten wird und das Befalls- und Schadensrisiko vernachlässigbar wird bzw. keine weiteren Maßnahmen des chemischen Holzschutzes nach DIN 68800-3 erforderlich sind. (DIN 68800-1, 2011, Kapitel 3.11)

Ausführungen mit besonderen baulichen Holzschutzmaßnahmen nach DIN 68800-2 sollten gegenüber Ausführungen mit Holzschutzmitteln nach DIN 68800-3 bevorzugt werden. Sollte jedoch ein chemischer Holzschutz erwünscht sein bzw. wird bei nichttragenden Holzbauteilen der Schutzerfolg allein durch bauliche Maßnahmen nach DIN 68800-2 nicht sichergestellt, kann auf eine Anwendung von Holzschutzmitteln nach DIN 68800-3 zurückgegriffen werden. (DIN 68800-1, 2011, Kapitel 8.1.3)

Alternativ zur Anwendung von besonderen baulichen Holzschutzmaßnahmen und Holzschutzmitteln dürfen Holzarten verwendet werden, welche eine ausreichende natürliche Dauerhaftigkeit gegen die jeweils vorliegende Gefährdung besitzen. Beispielhafte Holzarten sind Lärche oder Douglasie im Bereich der Nadelhölzer sowie Eiche oder Bongossi im Bereich der Laubhölzer. (DIN 68800-1, 2011) Ebenso dürfen Holzprodukte mit CE-Kennzeichnung, für die die Verwendbarkeit in der vorgesehenen Gebrauchsklasse nachgewiesen ist und die nach CE-Kennzeichnung eine ausreichende natürliche Dauerhaftigkeit gegen die jeweils vorliegende Gefährdung besitzen, eingesetzt werden. Letzte Alternative wäre für spezielle Schutzsysteme die Verwendung eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises. (DIN 68800-1, 2011, Kapitel 6)

2.10.5 Grundsätzliche bauliche Maßnahmen

Prinzipiell ist über die gesamte Dauer von Transport, Lagerung und Montage hinweg auf einen ausreichenden Schutz gegen nachteilige Einflüsse aus Feuchteänderungen zu achten, um den Baustoff Holz vor übermäßigem Schwinden und Quellen, sowie vor holzerstörenden Organismen zu schützen.

Im Einbauzustand ist eine Holzfeuchte entsprechend der zu erzielenden Gleichgewichtsfeuchte im Gebrauchszustand einzuhalten. Diese zu erzielende Holzfeuchte wird zum einen durch eine technische Trocknung während des Herstellungsprozesses und zum anderen durch Abdeckungen und möglichst kurze Lagerungs- sowie Montagedauern erzielt. In der Regel wird eine Gefährdung durch holzerstörende Insekten durch diese grundsätzlichen Maßnahmen ausgeschlossen. Zu erzielende Holzfeuchten in Abhängigkeit von Nutzungs- bzw. Gebrauchsklasse gemäß DIN EN 1995-1-1 bzw. DIN 68800-1 werden nachfolgend tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 2-26: Einbaufeuchten bzw. Gebrauchsfeuchten von Bauteilen (Dinger, 2012)

Nutzungsklasse	Gebrauchsklasse	Holzfeuchte
NKL 1: Geschlossene Bauwerke	GK 0 – 1	≤ 12 %
NKL 2: Überdeckte offene Bauwerke	GK 2	12 – 20 %
NKL 3: Konstruktion - der Witterung ausgesetzt - mit Wasseranreicherung - mit Wasserkontakt	GK 3 – GK 5	> 20 %

Zur Wahrung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften ist bei einem Einsatz in den Gebrauchsklassen GK 0 bis GK 2 eine Einbaufeuchte der Hölzer von über 20 % zu vermeiden. Ein maßgebendes Kriterium zur Beurteilung des allgemeinen Holzschutzes ist insbesondere die Einhaltung des Tauwasserschutzes zur Vermeidung von unzuträglicher Feuchteänderung gemäß DIN 4108-3. Der Nachweis einer tauwasserfreien Konstruktion, die Vermeidung von Wärmebrücken sowie das Sicherstellen der Luftdichtheit stellen bauphysikalische Maßnahmen der Planung dar. (siehe Kapitel 2.4, ff.)

Holzschutzmaßnahmen sind auch im Gebrauchszustand in Form eines dauerhaft wirksamen Wetterschutzes sicherzustellen. Dieser beinhaltet die bereits erwähnten Schutzmaßnahmen gegen Bewitterung in Form von Fassadenbekleidungen oder Vorsatzschalen zum Schutz des Kernelements. Gegen Spritzwasser und Erdfeuchte sind Schutzmaßnahmen in Form von ausreichend hoch ausgebildeten Sockeln erforderlich. Nachfolgende Tabelle fasst Anforderungen an den Spritzwasserbereich zusammen.

Tabelle 2-27: Anforderungen an Sockelausbildungen (DIN 68800-2, 2012, Kapitel 5.2.1.3)

Zulässige Abstände zwischen ‚Unterkante Holz‘ und ‚Oberkante Gelände‘	
≥ 300 mm	ohne weiteren Nachweis
≥ 150 mm	ohne weiteren Nachweis, wenn zusätzlich ein Kiesbett (Korngröße mindestens 16/32) mit mindestens 15 cm Breite und einem Abstand Außenkante Kiesbett zur Außenkante Schwelle von mindestens 30 cm <u>oder</u> ein Wasser ableitender Belag mit mindestens 2% Gefälle vorhanden ist.
≥ 50 mm	ohne weiteren Nachweis, wenn zusätzliche Maßnahmen gemäß „≥ 150 mm“ mit zusätzlichen geeigneten Abdichtungsmaßnahmen nach DIN 18195-4 als besondere bauliche Maßnahmen eingehalten werden.

Die Tabelle erfasst erforderliche Abstände zwischen ‚Unterkante Holz‘ und ‚Oberkante Gelände‘ in Abhängigkeit der Untergrundgegebenheiten, welche ohne weiteren Nachweis zulässig sind. Hierbei bezieht sich die Bezeichnung ‚Unterkante Holz‘ auf das Holzbauteil, welches von der ‚Oberkante Gelände‘ den geringsten Abstand aufweist. Zulässige Abstände kleiner 150 mm werden im nachfolgenden Kapitel 2.10.6 (Besondere bauliche Maßnahmen) dargestellt.

Nachfolgende Abbildung stellt Anforderungen an zulässige Abstände ab 150 mm gemäß DIN 68800-2 am Beispiel einer hinterlüfteten Außenwand dar. Die Bezeichnung ‚Unterkante Holz‘ ist hierbei nicht klar definiert und kann sich in diesem Fall je nach Abstand auf die Unterkante der Holzfassade oder auf die Unterkante der Schwelle beziehen. Genau genommen ist dies als Empfehlung zu betrachten und liegt in der Entscheidungsfreiheit des Bauherrn. Alternativ könnte der Einsatz einer Schalung als Verschleißschicht im Spritzwasserbereich bzw. dem zulässigen Abstand entschieden werden.

Die zulässigen Abstände machen ersichtlich, dass im erdberührten sowie spritzwassergefährdeten Sockelbereich bauaufsichtlich zugelassene Perimeterdämmplatten mit Sockelputz zum Einsatz kommen. Ein entsprechendes Detail mit Kompaktfassade wäre analog auszuführen, wobei sich ‚Unterkante Holz‘ eindeutig auf die Unterkante der Schwelle beziehen würde.

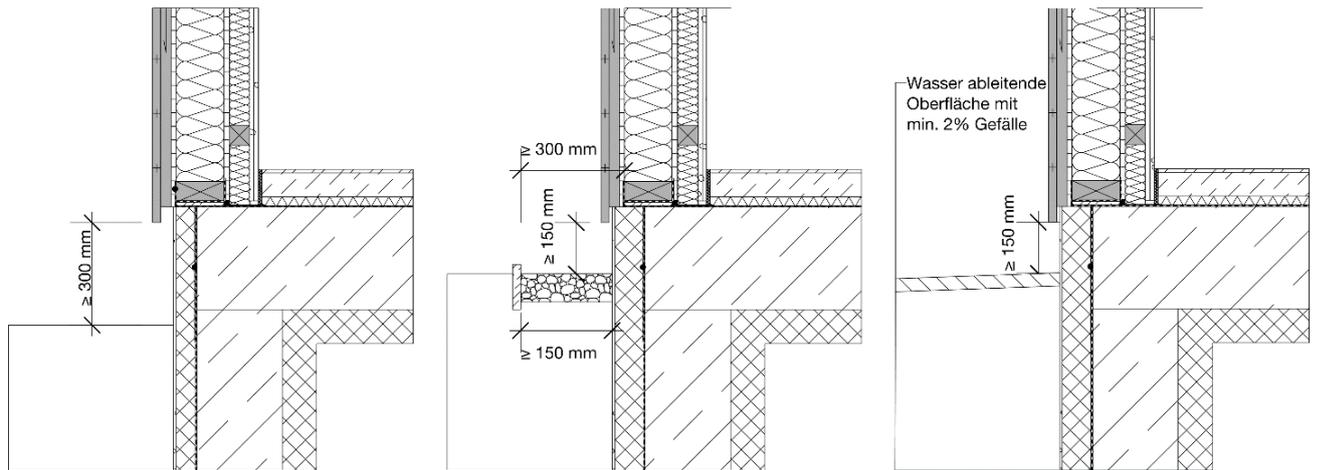


Abbildung 2-47: Sockelausbildungen der Gebrauchsklasse GK 0 gemäß DIN 68800-2 (Eigene Darstellung)

Das Kiesbett sollte mindestens eine Korngröße 16/32 aufweisen. Abstände zwischen Unterkante Holz (hier: Fassade) und Oberkante Gelände ab 50 mm benötigen zusätzlich geeignete Abdichtungsmaßnahmen nach DIN 18195-4 (siehe Kapitel 2.10.6).

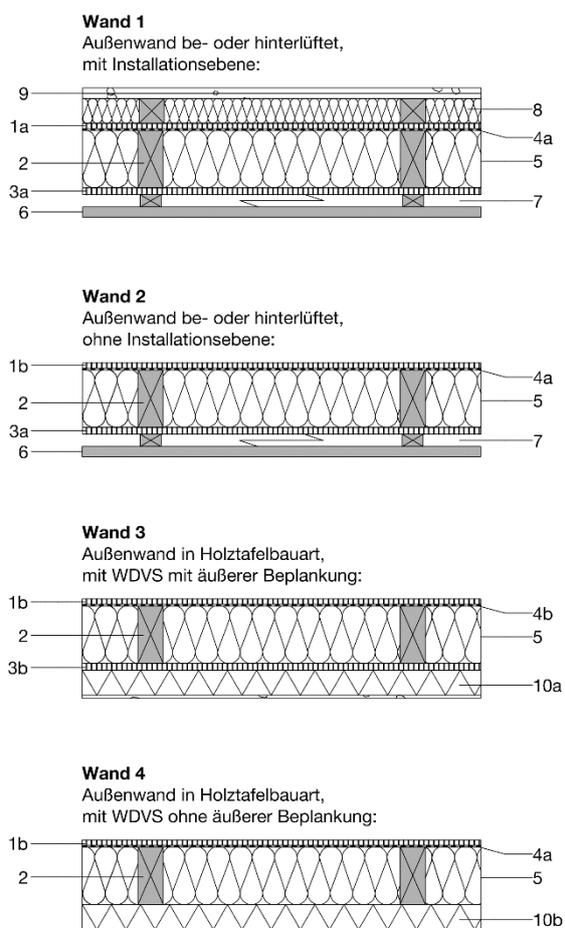
Bei Außenbauteilen ist generell im Bereich von Anschlüssen, Stößen, Fenstern und Außentüren darauf zu achten, dass eine Anreicherung von Wasser im Holz ausgeschlossen ist (DIN 68800-2, 2012, Kapitel 5.2.1.1). Insbesondere mit zunehmender Gebäudehöhe ist eine verstärkte Wind- und Schlagregenbeanspruchung zu beachten.

2.10.6 Besondere bauliche Maßnahmen

In manchen Fällen reichen die grundsätzlichen baulichen Maßnahmen zur Einstufung in die Gebrauchsklasse GK 0 nicht aus. In diesen Fällen werden besondere bauliche Maßnahmen erforderlich, um auf Gebrauchsklasse GK 0 abmindern zu können.

Außenwände sowie Sockelausbildungen gemäß Anhang A der DIN 68800-2 erfüllen die Anforderungen sowohl an die grundsätzlichen als auch an die besonderen baulichen Maßnahmen, wodurch eine Einstufung in die Gebrauchsklasse GK 0 erfolgt. Bei Auswahl einer Konstruktion innerhalb dieser Regelkonstruktionen ist ohne weiteren Nachweis ein chemischer Holzschutz nicht erforderlich.

Die nachfolgenden Fassadenschnitte gemäß Anhang A der DIN 68800-2 geben einen Überblick über die Zuordnung einer Außenwand zur Gebrauchsklasse 0.



Legende

- 1a Innere Beplankung, luftdicht ausgebildet
- 1b Innere Beplankung, ein- oder mehrlagig
- 2 Holzständer
- 3a Äußere Beplankung, $s_d \leq 0,3$ m oder Holzfaserdämmplatte nach DIN EN 13171
- 3b Äußere Beplankung
- 4a Dampfbremse $s_d \geq 2$ m in Verbindung mit Schicht 1
- 4b Dampfbremse $s_d \geq 20$ m in Verbindung mit Schicht 1
- 5 Mineralischer Faserdämmstoff nach DIN EN 13162, Holzfaserdämmplatten nach DIN EN 13171 oder Dämmstoff mit geeigneter bauaufsichtlicher Zulassung
- 6 Wetterschutz (dauerhaft wirksam), auf lotrechter Lattung (Lattung kann GK 0 zugeordnet werden)
- 7 Be- oder hinterlüfteter Hohlraum, $d \geq 20$ mm
Es sind Be- und Entlüftungsöffnungen mit Querschnittsflächen von jeweils mindestens 50 cm^2 je 1 m Wandlänge vorzusehen.
- 8 Installationsebene (mit oder ohne Dämmung)
- 9 Raumseitige Bekleidung (ein- oder mehrlagig)
- 10a WDVS (Hartschaum-, Mineralfaser- oder Holzfaserdämmplatten, ein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis ist erforderlich)
- 10b WDVS (Holzfaserdämmplatten, ein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis ist erforderlich)

ANMERKUNG:

- Die Funktion von Schicht 4 kann je von Schicht 1 erfüllt werden.
- Wurden Wände 1 und 2 werkseitig hergestellt, ist auch zulässig:
 - i) Dampfbremse $20 \text{ m} \leq s_d \leq 50 \text{ m}$ in Verbindung mit 1a
 - ii) Äußere Beplankung $s_d \leq 4 \text{ m}$
- Wände 3 und 4 auch mit Installationsebene wie in Bild 1 möglich.

Abbildung 2-48: Außenwandkonstruktionen der Gebrauchsklasse GK 0 gemäß Anhang A, DIN 68800-2 (Eigene Darstellung)

Im Sockelbereich können Abstände zwischen ‚Unterkante Holz‘ und ‚Oberkante Gelände‘ unter 150 mm (vgl. Kapitel 2.10.5) ausgeführt werden, solange geeignete Abdichtungsmaßnahmen gemäß DIN 18195-4 (DIN 18195-4, 2011) eingehalten werden. Dies bedeutet, dass zum Schutz gegen Durchfeuchtung die Oberkante der Abdichtung im Sockelbereich mindestens 150 mm über Geländeroberkante reichen muss. Nachfolgende Abbildung stellt dabei die Bedingungen einer Sockelausbildung gemäß Anhang A, DIN 68800-2 am Beispiel einer Außenwand mit WDVS dar. Die Abbildung macht ersichtlich, dass im erdberührten sowie spritzwassergefährdeten Sockelbereich bauaufsichtlich zugelassene Perimeterdämmplatten mit Sockelputz zum Einsatz kommen. Ein entsprechender Wandaufbau mit hinterlüfteter Fassade und/oder einem Sockel mit festem Belag und Gefälle wäre analog auszuführen. Zu beachten wäre im Falle einer hinterlüfteten Fassade, dass innerhalb des Spritzwasserbereichs von 150 mm der Einsatz einer Schalung als Verschleißschicht einzuplanen ist.

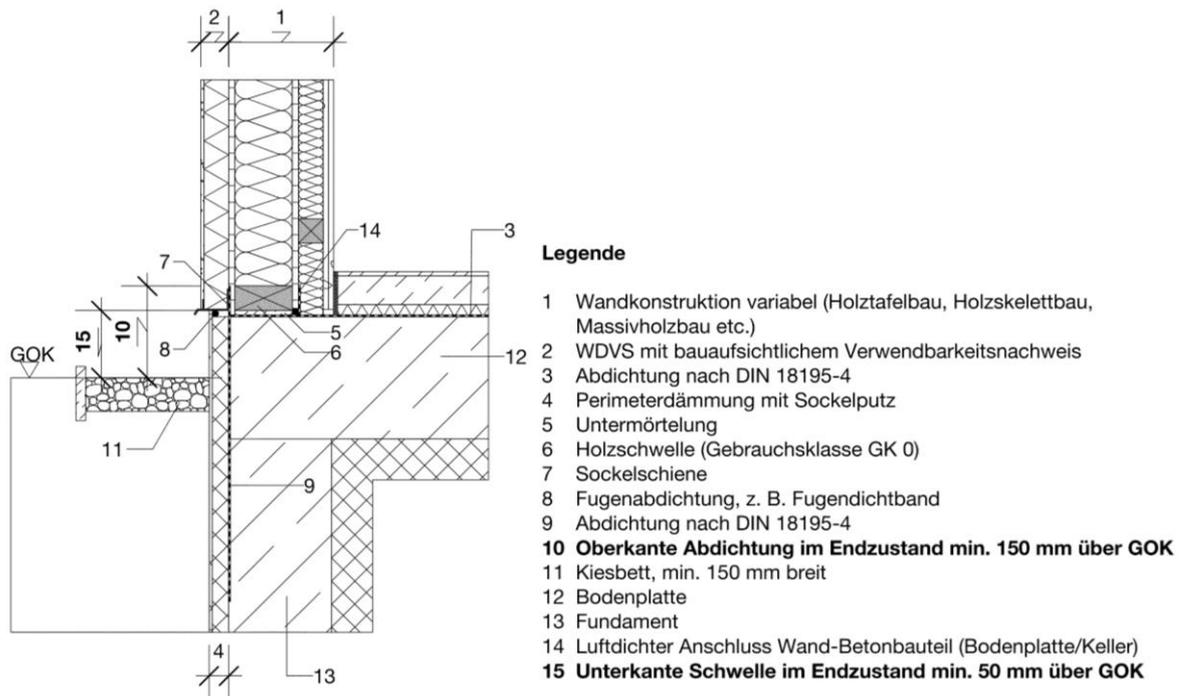


Abbildung 2-49: Sockelausbildung der Gebrauchsklasse GK 0 gemäß Anhang A, DIN 68800-2 inklusive Abdichtungsmaßnahmen gemäß DIN 18195-4 (Eigene Darstellung)

In Bezug auf die genannte Fugenabdichtung (Abbildung 2-49, Legende lfd. Nummer 8) ist darauf zu achten, dass ein Produkt eingesetzt wird, welches für diesen Anwendungsbereich als geeignet deklariert ist. (DIN e.V., 2012)

2.10.7 Maßnahmen mit Holzschutzmitteln

Ebenso wie für die Planung von besonderen baulichen Maßnahmen gemäß DIN 68800-2 gelten auch für vorbeugende Schutzmaßnahmen von Holz mit Holzschutzmitteln gemäß DIN 68800-3 die grundsätzlichen baulichen Maßnahmen gemäß DIN 68800-1 als Planungsgrundlage. Holz und Holzprodukte, welche mit Holzschutzmitteln behandelt wurden, werden hinsichtlich der Verwendbarkeit in den Gebrauchsklassen durch die Art des verwendeten Holzschutzmittels, die Eindringtiefe und die Einbring- oder Aufbringmenge definiert. (DIN 68800-3, 2012, Kapitel 5.1.2) Gemäß DIN 68800-3 „... sind [für Holz und Holzprodukte] neben den Holzschutzmitteln mit bauaufsichtlichem Verwendbarkeitsnachweis nur Holzschutzmittel zu verwenden, deren Wirksamkeit durch eine akkreditierte Stelle nachgewiesen wurde.“ (DIN 68800-3, 2012, Kapitel 5.3.1.2) In diesem Fall sind entsprechende Angaben auf dem Etikett oder den begleitenden technischen Informationen erforderlich. (DIN 68800-3, 2012, Kapitel 5.3.3.2, 5.3.4.3)

Im Falle eines Prüfprädikats wird im Rahmen eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises ein Kurzzeichen zur Charakterisierung wichtiger Schutzmitteleigenschaften vergeben. Nachfolgende Tabelle aus DIN 68800-3 zeigt die Anforderungen an das zu verwendende Holzschutzmittel bzw. das aufgrund dessen erforderliche Prüfprädiat des Holzschutzmittels in Abhängigkeit der Gebrauchsklasse im vorgesehenen Anwendungsbereich auf.

Tabelle 2-28: Auswahl der Holzschutzmittel in Abhängigkeit von der Gebrauchsklasse (DIN 68800-3, 2012, Tabelle 1)

GK	Anforderungen an das Holzschutzmittel	Kurzzeichen
0	Keine Holzschutzmittel erforderlich	
1	Insektenvorbeugend	lv
2 ^{a, b}	Insektenvorbeugend	lv
	Pilzwidrig	P
3.1 ^b	Insektenvorbeugend	lv
3.2 ^b	Pilzwidrig	P
	Witterungsbeständig	W
4	Insektenvorbeugend	lv
	Pilzwidrig	P
	Witterungsbeständig	W
	Moderfäulewidrig	E
5	Wie für GK 4; zusätzlich Wirksamkeit gegen Holzschädlinge im Meerwasser	

^a Bei Holzbauteilen, für die keine Gefährdung durch Insektenbefall vorliegt, kann auf eine insektenvorbeugende Wirkung verzichtet werden.

^b Bei Gefährdung durch Bläuepilze an verbautem Holz in den Gebrauchsklassen 2 und 3 kann eine bläuewidrige Wirksamkeit (Kurzzeichen B) zweckmäßig sein; hierfür ist eine besondere Vereinbarung erforderlich.

Kurzzeichenlegende:
 lv: Gegen Insekten vorbeugend wirksam
 P: Gegen Pilze vorbeugend wirksam (Fäulnisschutz)
 W: Auch für Holz, das der Witterung ausgesetzt ist, jedoch weder im ständigen Erdkontakt noch im ständigen Kontakt mit Wasser
 E: Auch für Holz, das extremer Beanspruchung ausgesetzt ist (im ständigen Erdkontakt oder im ständigen Kontakt mit Wasser sowie bei Schmutzablagerungen in Rissen und Fugen)

2.11 Energieeffizienz (erhöhter energetischer Standard) und Nachhaltigkeit

Vor dem Hintergrund der Klimaziele – Klimaneutraler Neubau auf Basis von primärenergetischen Kennwerten bis 2020 – muss der energetische Standard definiert werden. Die Einhaltung der aktuell geltenden Energieeinsparverordnung ist hierbei ein guter Ansatz. Innerhalb einer vorausschauenden und nachhaltigen Planung sollte allerdings bereits jetzt energieeffizienter und ressourcenschonender geplant und gebaut werden.

Die Brundtland-Kommission der Vereinten Nationen (UN) definierte die Nachhaltigkeit folgendermaßen: „Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die die Lebensqualität der gegenwärtigen Generation sichert und gleichzeitig zukünftigen Generationen die Wahlmöglichkeit zur Gestaltung ihres Lebens erhält.“ Seit der UN Konferenz für Umwelt und Entwicklung im Jahre 1992 und der Enquete-Kommission¹ des Deutschen Bundestages 1998 gilt für 178 Länder als gemeinsames Leitbild das „Drei-Säulen-Modell“ bzw. das „Nachhaltigkeitsdreieck“ (Abbildung 2-50). (BNE Portal, o.J.) Laut diesem Modell müssen die Ökologie (Ressourcenschonung), die Ökonomie (wirtschaftliche Leistungsfähigkeit) und das Sozio-Kulturelle (Gleichberechtigung, friedliches Zusammenleben) gleichermaßen berücksichtigt werden, um nachhaltiges Planen und Bauen zu gewährleisten.

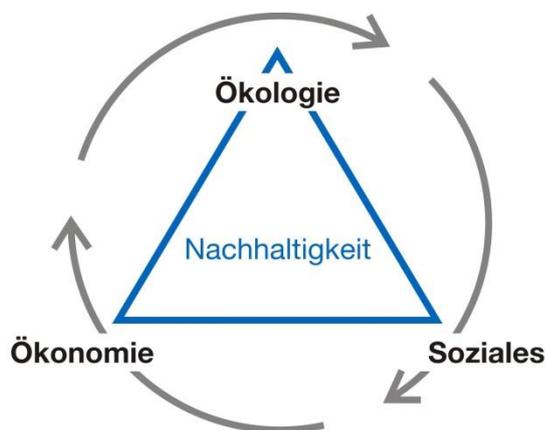


Abbildung 2-50: Nachhaltigkeitsdreieck (Eigene Darstellung)

Gebäude können einen entscheidenden Beitrag nicht nur zu ökonomischen und soziokulturellen Qualitäten leisten, sondern haben besonders auf dem Gebiet der Ökologie wesentliche Bedeutung. In Gebäuden werden ca. 30 % der globalen Rohstoffressourcen verbaut, ebenso wie dem Gebäudesektor ca. 40% des Primärenergiebedarfs in Deutschland zugeschrieben werden. (UNEP, o.J.) Das bedeutet, dass der Gebäudesektor durch Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz und den behutsamen Umgang mit Ressourcen auf dem Gebiet der ökologischen Nachhaltigkeit eine große Hebelwirkung besitzt.

¹ Enquete Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“, 1998

2.11.1 Normative Entwicklung und jeweilige Anforderungen – Europäische Gebäuderichtlinie 2010/31/EU

Die normative Entwicklung in Bezug auf die Energieeffizienz von Gebäuden sieht eine stufenweise Anpassung an den Niedrigstenergiegebäudestandard vor, was die von Gerd Hauser entwickelte Grafik des energiesparenden Bauens verdeutlicht (Abbildung 2-51). Die Baupraxis hat sich über die letzten Jahre hinweg meist unterhalb der geforderten Primärenergiebedarfe bewegt und sollte dies auch weiterführen, indem Innovationen und neue Forschungserkenntnisse in die Tat umgesetzt werden. So wird ein Bauprojekt von der Forschungsgruppe begleitet, bei welchem der Niedrigstenergiestandard KfW-55 nach EnEV 2014 mit zusätzlich 25% Reduzierung des Jahresprimärenergiebedarfs in Kombination mit der Hybridbauweise umgesetzt wird.

Entwicklung des energieeffizienten Bauens in Deutschland am Beispiel von Wohngebäuden

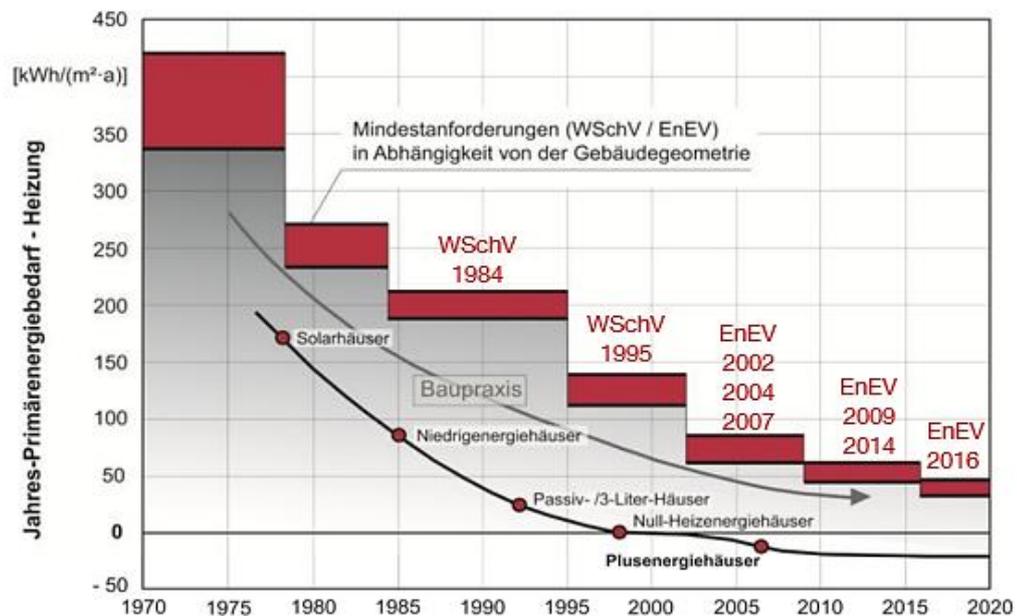


Abbildung 2-51: Entwicklung des energiesparenden Bauens nach (Hauser, 2014)

Nach der europäischen Gebäuderichtlinie 2010/31/EU müssen die Mitgliedsstaaten gewährleisten, dass neue Gebäude, die von Behörden als Eigentümer genutzt und nach dem 31. Dezember 2018 erstellt werden, Niedrigstenergiegebäude sind. Bis zum 31.12.2020 müssen alle neuen Gebäude mit diesem Standard errichtet werden. Die Definition des Standards nach Artikel 2, Absatz 2 der Richtlinie lautet:

„[Ein] ‚Niedrigstenergiegebäude‘ [beschreibt] ein Gebäude, das eine sehr hohe, nach Anhang I bestimmte Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen – einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird – gedeckt werden[.]“ (2010/31/EU, 2010)

Bei der Erstellung des Standards sind neben den thermischen Eigenschaften insbesondere die Auslegung der Gebäudetechnik, passive Solarsysteme, Sonnenschutz, Gestaltung, Ausrichtung des Gebäudes, interne Lasten sowie positive Einflüsse wie die lokale Sonnenexposition, natürliche Beleuchtungen und die Elektrizitätsgewinnung durch Kraft-Wärme-Kopplung zu berücksichtigen.

Die thermischen Eigenschaften werden bestimmt durch:

- Wärmekapazität
 - Wärmedämmung
 - Wärmebrücken
 - Passive Heizung
 - Kühlelemente
- } Bauteile
- } Anlagentechnik

Die Umsetzung des Standards, die Überprüfung als auch die Schaffung von finanziellen Anreizen obliegen den einzelnen Mitgliedsstaaten. In Deutschland wird das energieeffiziente Bauen durch unterschiedliche von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) aufgelegte Programme für Privatpersonen und Unternehmen definiert und gefördert. Weitere Informationen zu den KfW- Förderprogrammen können der Internetseite www.kfw.de entnommen werden.

2.11.2 KfW- Effizienzhaus KfW-55 nach EnEV 2014

Der deutsche Standard der Niedrigstenergiehäuser kann derzeit nach der KfW-Effizienz 55 interpretiert werden. Ein Wohnhaus gilt demnach als Niedrigstenergiehaus, wenn es maximal 55% des nach EnEV 2014 errechneten spezifischen Jahresprimärenergiebedarf Q_P benötigt, den ein Referenzgebäude gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung braucht. Die Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf und die energetische Auslegung des Referenzgebäudes hat sich zwar seit der EnEV 2009 nicht geändert. Nach Tabelle 1 der EnEV 2014 sinkt jedoch ab dem 1. Januar 2016 der zulässige Höchstwert des Jahres-Primärenergiebedarfs um 25%. Zudem darf bei Wohngebäuden ab diesem Zeitpunkt der 1,0-fache Transmissionswärmeverlust des Referenzgebäudes nicht mehr überschritten werden. Parallel werden bei Nichtwohngebäuden die Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten um 20% gesenkt. Aber es werden nicht nur die thermischen Eigenschaften eines Gebäudes modifiziert. Auch der Primärenergiefaktor f_p für Strom wird ab dem 01.01.2016 von 2,6 auf 1,8 abgesenkt. Somit werden z.B. strombetriebene Wärmepumpen oder elektrische Warmwasserbereitung wesentlich besser als bisher bewertet. Weitere Randbedingungen zur Bilanzierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden können der EnEV 2014 entnommen werden.

In der Gesamtheit betrachtet wird die Energieeffizienz zwar durch die erhöhten thermischen Eigenschaften gesteigert, die Auslegung des Jahresprimärenergiebedarfs ist allerdings kritisch zu hinterfragen. Hier trägt ab Januar 2016 in einigen Fällen (u.a. Nachtspeicheröfen) bereits eine theoretische Verbesserung des Formbeiwertes f_p zu einer „Effizienzsteigerung“ bei. Aus den Definitionen geht zusätzlich nicht klar hervor, wie hoch die Endenergiemenge (z.B. die Menge an Heizöl) ist. Niedrigstenergiegebäude zeichnen sich derzeit also weniger über ihre Energieeffizienz aus, sondern eher über ihren günstigen Primärenergiefaktor.

2.11.3 Passivhausstandard

Der Passivhausstandard ist hier einen Schritt voraus. Ein Gebäude wird als Passivhaus deklariert, wenn es aufgrund von überdurchschnittlichen Wärmedämmeigenschaften in Kombination mit haustechnischen Anlagen sowohl im Winter als auch im Sommer keine herkömmliche Heizungs- oder Kühlleistung zur Deckung des Heizenergiebedarfs benötigt (Jahresheizwärmebedarf $Q_H < 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$). Das Wort „passiv“ tritt auf, da der überwiegende Teil des Wärmebedarfs aus „passiven“ Quellen, wie solarer Einstrahlung oder Erdwärme, sowie Abwärme von Personen und technischen Geräten gedeckt werden soll. Ferner wird

der Energieverbrauch von Licht, Haushaltsgeräten usw. begrenzt. Die Kennwerte für den Passivhausstandard, welche Abbildung 2-52 in dargestellt sind, sind nicht gesetzlich geregelt, sondern vom Passivhaus-Institut (PHI) Darmstadt entwickelt worden. Der Nachweis kann über das Passivhaus-Projektierungspaket des Instituts (PHPP) geführt werden. (Energie-M, o.J.)

Um die hohen Standards erreichen zu können, werden folgende Maßnahmen definiert bzw. empfohlen:

- Hochwärmedämmende Fenster und Türen: U_w bzw. $U_D \leq 0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ mit Verglasungen $U_g \leq 0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$; (3-fach Wärmedämmverglasungen)
- Überdurchschnittliche Dämmung der Außenbauteile: U-Werte zwischen 0,10 und 0,15 $\text{W/(m}^2\text{K)}$
- Wärmebrückenfreie Konstruktion: $\psi < 0,01 \text{ W/(m}^2\text{K)}$
- Oberflächentemperaturen mind. 17°C (bei einer Außentemperatur $\theta_e = -10^\circ\text{C}$)
- Dichte Gebäudehülle: $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$
- Kontrollierte Wohnungslüftung: Anforderung $30 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$ mit Wärmerückgewinnung $\eta > 80\%$
- Latentwärmenutzung: Wärmepumpentechnik
- Geringer Energieverbrauch bei der Brauchwasserbereitung und -verteilung
- Erdreichwärmetauscher: Vorerwärmung der Frischluft
- Verwendung effizienter Haushaltgeräte
- Deckung des Restenergiebedarfs durch erneuerbare Energien (z.B. thermische Solaranlage)
- Passive Solarenergienutzung: optimale Orientierung der Gebäude zur Südseite

Was die Neubauten betrifft, so sind die größten Einsparungen bei der Primärenergie von der Art der Energieversorgung abhängig. Im Zusammenhang mit den Nachhaltigkeitsaspekten Ökologie und Ökonomie spielt die Verwendung von nachwachsenden Baustoffen bei effizienzoptimierten Gebäudeausführungen eine immer dominierendere Rolle. Nachwachsende Rohstoffe wie Holz nehmen hier eine Vorreiterrolle ein. Welche Dämmqualität im Holztafelbau im Vergleich zu anderen massiven Konstruktionsaufbauten erreicht werden kann, zeigt Abbildung 2-52.

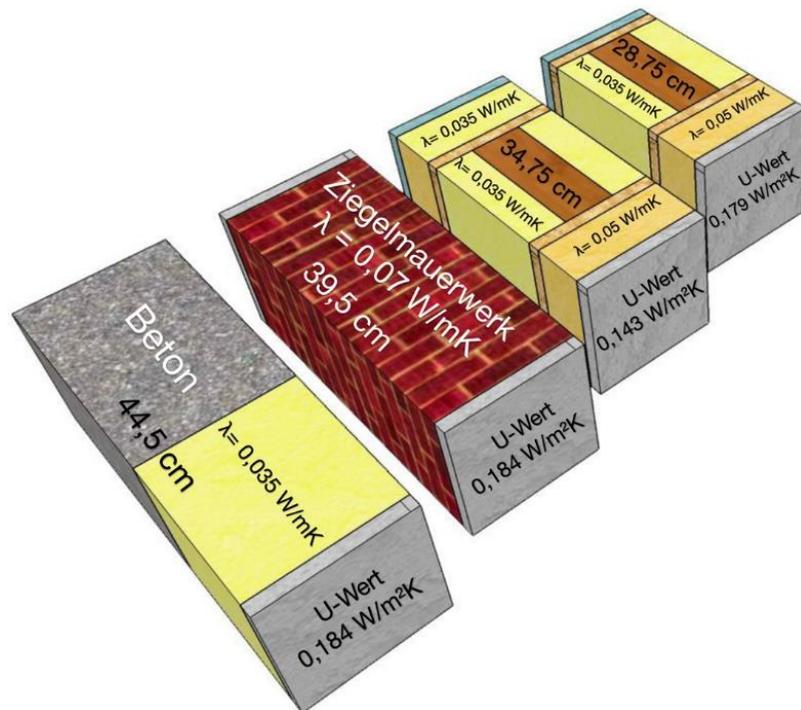


Abbildung 2-52: Vergleich der Bauteildicken je Bauweise für den Niedrigstenergiestandard, eigene Darstellung nach (holzbau handbuch R01 T01 F07, 2009, A1.17b)

Es zeigt sich, dass man im Holztafelbau bereits mit einer Bauteildicke von ca. 290 mm einen U-Wert von $0,179 W/(m^2K)$ erreichen kann. Für den Niedrigstenergiestandard benötigt man je nach Randbedingungen für Außenwände einen U-Wert $< 0,19 W/m^2K$ (Erfahrungswert). Die Flächeneinsparnis liegt gegenüber einer Stahlbetonwand mit WDVS bei über 35%. Der PH-Standard wird mit einer Bauteildicke von 347,5 mm erreicht. Folgende Tabelle stellt nochmals die Anforderungen des EnEV- und Passivhausstandards für Wohngebäude gegenüber.

Tabelle 2-29: Kennwerte der Energiestandards

Bauteil/Systeme	EnEV 2014-Referenzgebäude	Passivhaus
U- Wert Außenwand, Geschossdecke gegen Außenluft	0,28 W/(m ² ·K)	< 0,15 W/(m ² ·K) (anzustreben 0,10 W/(m ² ·K))
U-Wert Außenwand gegen Erdreich, Bodenplatte, Wände und Decken zu unbeheizten Räumen	0,35 W/(m ² ·K)	< 0,15 W/(m ² ·K)
U-Wert Dach, oberste Geschossdecke, Wände zu Abseiten	0,20 W/(m ² ·K)	< 0,15 W/(m ² ·K)
U- Wert von Fenstern, Fenstertüren	1,3 W/(m ² ·K)	< 0,80 W/(m ² ·K) Wobei $g \cdot 1,6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \geq U_g$
Wärmebrückenfreie Konstruktionen	-	$\psi < 0,01 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
Luftdichtheit	<u>Gebäude mit Luftvolumenstrom < 1500 m³:</u> Gebäude ohne raumluftechnische Anlagen: $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen: $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ <u>Gebäude mit Luftvolumenstrom > 1500 m³:</u> Gebäude ohne raumluftechnische Anlage: $n_{50} = 4,5 \text{ h}^{-1}$ Gebäude mit raumluftechnischen Anlagen: $n_{50} = 2,5 \text{ h}^{-1}$	$n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$
Abluft-Wärmerückgewinnung		Wirkungsgrad >75%
Jahresprimärenergiebedarf/ Jahresheizwärmebedarf	nach Referenzgebäude	$Q_H < 15 \text{ kWh/(m}^2 \cdot \text{a)}$
Maximale Heizlast	-	< 10 kWh/m ²

Aus obiger Tabelle wird ersichtlich, dass bei dem PH-Standard durch die hohe Anforderung an die Luftdichtheit kontrolliert gelüftet werden muss. Hierbei ist eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung notwendig, denn über eine Fensterlüftung würde die durch die hohe Wärmedämmung gewonnene Energie sofort wieder verloren gehen. Es ist zu berücksichtigen, dass mit dem Einsatz von Lüftungsanlagen nicht nur der energetische Standard eines Gebäudes steigt sondern auch seine Bau- und Unterhaltskosten. So ist die Wahl des Energiestandards im Einzelfall zu prüfen.

2.12 Lebenszyklusanalyse und Recyclingkonzepte

Mit zunehmender Energieeffizienz des Gebäudebetriebs erlangt die für die Erstellung, Instandsetzung und Rückbau aufgewendete Energie einen immer größeren Anteil am Gesamtenergieverbrauch. Damit Gebäude im Betrieb nur noch sehr wenig Energie verbrauchen, ist ein aufwendigerer Bauprozess nötig. Dabei stellt sich die Frage, ob und zu welchem Zeitpunkt im Lebenszyklus des Gebäudes sich der erhöhte Energieaufwand für die Erstellung eines sehr energieeffizienten Gebäudes durch die Energieeinsparung im Betrieb amortisiert. Im Fall von Plusenergie-Gebäuden ist es unter Umständen sogar möglich, den Energieaufwand für die Erstellung des Gebäudes nicht rechnerisch durch Energieeinsparung, sondern tatsächlich durch Energieerzeugung am Gebäude zu kompensieren.

Über den Energieverbrauch hinaus werden zunehmend auch andere Aspekte einer gesunden Umwelt in Betracht gezogen. Dies erfolgt derzeit in der Regel in Form einer Ökobilanzierung. Hierfür werden im folgenden Kapitel die Grundlagen dargestellt.

Mit zunehmender Rohstoffknappheit kommt zu den Themen Energie und Umweltwirkungen das Ziel der Ressourceneffizienz im Baumaterialeinsatz hinzu. Der Verbrauch von nicht erneuerbaren bzw. der Gebrauch von erneuerbaren Rohstoffen wird umso relevanter, je mehr Nachfrage nach Baumaterialien global besteht. Mit der prognostizierten Zunahme der Weltbevölkerung ist es daher notwendig, möglichst viel Material aus erneuerbaren Quellen zu nutzen. Bei einer Verwendung von nicht erneuerbaren Materialien ist darauf zu achten, dass dieses Material bei Abbruch oder Sanierung des Gebäudes wiedergewonnen und in gleicher Qualität wiederverwendet werden kann.

Eine genauere Definition für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen ist in der Bauproduktenverordnung (BauPVO, Anhang I, Nr. 7) enthalten:

„Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist:

- a) Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können;*
- b) das Bauwerk muss dauerhaft sein;*
- c) für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“*

2.12.1 Allgemein

2.12.1.1 Graue Energie und Kumulierter Energieaufwand

Unter dem Begriff „Primärenergie“ versteht man den „Energieinhalt von Energieträgern, die in der Natur vorkommen und technisch noch nicht umgewandelt wurden.“ (VDI 4600, 2012) Das bedeutet, Primärenergie ist die Energie, die an der Quelle gewonnen werden muss, um einen bestimmten Nutzen zu erzielen, zum Beispiel die Herstellung eines Baustoffs oder das Beheizen von Gebäuden. Die Primärenergie beinhaltet zusätzlich zu der Energie, die für den Nutzen direkt benötigt wird, die Umwandlungsverluste, die zwischen Energiequelle und Nutzung anfallen (s. *Abbildung 2-53*).

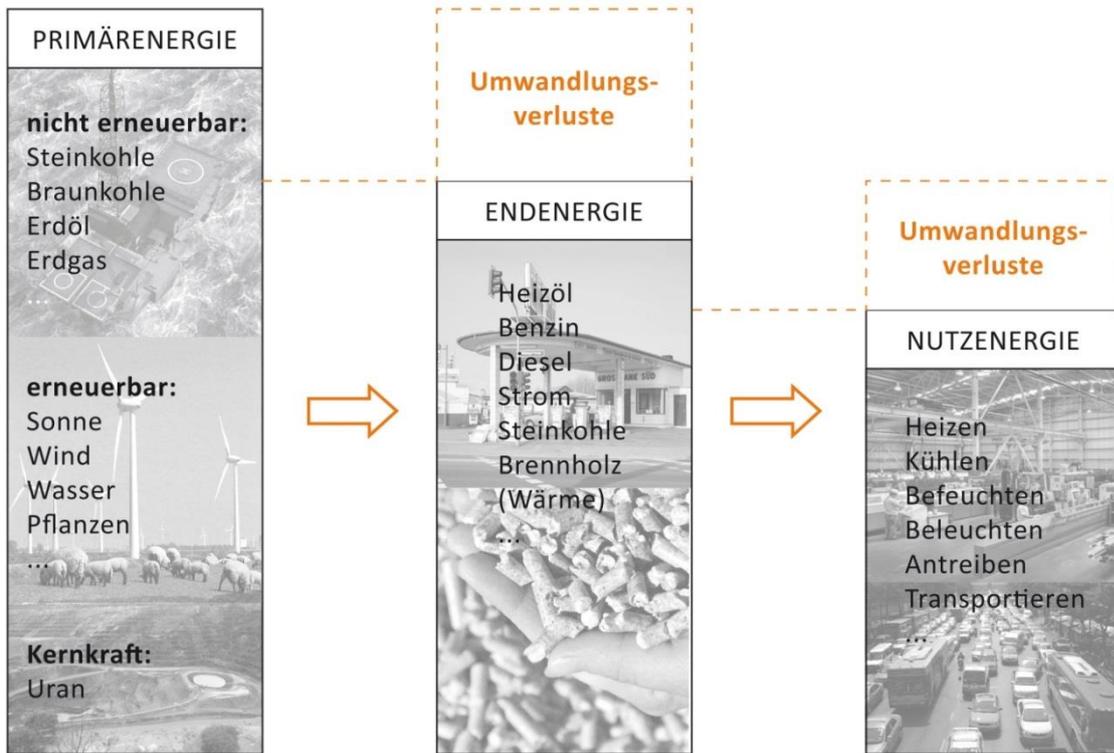


Abbildung 2-53: Primärenergie – Endenergie - Nutzenergie (Eigene Darstellung nach Wikimedia Commons, 2013a)

Der Begriff „Graue Energie“ wird in der Literatur unterschiedlich verwendet. Der SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) definiert in seinem Merkblatt 2032 „Graue Energie von Gebäuden“ die Graue Energie als die nicht erneuerbare Primärenergie, die zur Herstellung und Entsorgung aller am Gebäude verwendeten Baustoffe aufgewendet wird. In diesem Merkblatt ist auch die Berechnung der Grauen Energie eines Gebäudes klar definiert: „Die Graue Energie für die Erstellung eines Gebäudes ist gleich der Summe der Grauen Energie für die Herstellung aller Bauteile, die für die Erstellung verwendet werden.“ Zusätzlich unterscheidet diese Definition noch die Graue Energie für die Entsorgung eines Gebäudes. Sie „(...) ist gleich der Summe der Grauen Energie für die Entsorgung aller Bauteile des rückzubauenden Gebäudes. (SIA, 2010)

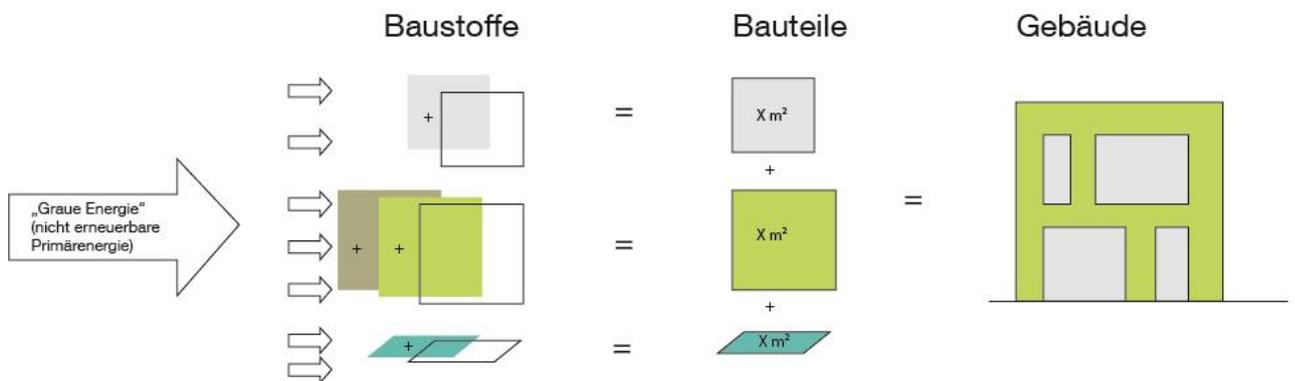


Abbildung 2-54: Graue Energie Herstellung nach SIA 2032 (Eigene Darstellung)

Andere Quellen definieren die „Graue Energie“ dagegen anders bzw. unschärfer. Hier ist zum Beispiel eine Definition der „Grauen Energie“ zu nennen, die damit „die gesamte Primärenergie, die für die Herstellung

eines Materials aufgewendet wird“ (z.B. (Baunetz, o.J.)) bezeichnet, d.h. hier wird die Entsorgungsphase vernachlässigt. Eine weitere Definition bezeichnet die „Energienmenge, die für Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes notwendig ist“ (Zeumer, 2009) als „Graue Energie“. Damit ist die Entsorgungsphase neben anderen Phasen eines Produktlebenszyklus in die Definition eingeschlossen. Um also die „Graue Energie“ als Optimierungskriterium nutzen zu können, muss sie zunächst eindeutig definiert sein. In der vorliegenden Studie wird die Definition des SIA zugrunde gelegt.

Dennoch gibt es auch in Deutschland einen normierten Begriff, der die Energiemenge des Gesamtlebenszyklus einschließt. Es handelt sich hierbei um den „Kumulierten Energieaufwand“ (KEA), der in der VDI 4600 folgendermaßen definiert wird:

„Der KEA gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann.“ (VDI 4600, 2012, Kapitel 4.1)

Damit beinhaltet der Kumulierte Energieaufwand eines Gebäudes auch die Betriebsenergie, während die „Graue Energie“ den Betriebsenergieaufwand nicht berücksichtigt. Der KEA setzt sich darüber hinaus aus nicht regenerativen und regenerativen Quellen zusammen. Er allein ist daher nur bedingt aussagekräftig hinsichtlich der ökologischen Qualität eines Baustoffes oder Bauwerkes. Um eine verwendbare Aussage zur Qualität des Energieaufwandes zu bekommen, müssen die Anteile des erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergieaufwandes am KEA mit einbezogen werden.

Der KEA für ein Gebäude gibt demzufolge an, welcher Aufwand an Primärenergie für Erstellung, Betrieb, Instandhaltung und Entsorgung eines Gebäudes anfällt. Der Primärenergieaufwand des Gebäudes ohne den Betrieb ist somit die Summe des für die Baustoffe jeweils benötigten KEA. Tabelle 2-30 und *Abbildung 2-55* zeigen den in der VDI angegebenen KEA für einzelne Baustoffe und zum Vergleich den in der Ökobaudat 2011 und 2015 zu findenden Gesamt-Primärenergieinhalt für die Herstellung. Die zum Teil großen Differenzen stammen zum einen aus der Tatsache, dass dem KEA der VDI 4600 Daten aus dem Jahr 1999 zugrunde liegen, während die Ökobaudat meist mit neueren Werten arbeitet. Zum anderen kann vermutet werden, dass unterschiedliche Annahmen getroffen wurden und ggf. unterschiedliche Berechnungsweisen zugrunde liegen. Es ist aus dieser eingegrenzten Auswahl von Baustoffen schon offensichtlich, dass je nach verwendeter Datengrundlage sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sollte nach Möglichkeit mit einer Datengrundlage gerechnet werden und diese muss transparent zu erkennen sein.

Tabelle 2-30: Beispiele des KEA zur Herstellung von Baustoffen nach VDI 4600 (VDI 4600, 2013) und Gesamtprimärenergieinhalt Herstellung nach Ökobaudat (BMUB, o.J.)

Bezeichnung der Daten	KEA Herstellung in MJ / t (VDI 4600)	PE (ern. + n.ern) Herstellung in MJ / t nach Ökobaudat 2011 (% erneuerbar)	PE (ern. + n.ern) Herstellung in MJ / t nach Ökobaudat 2015 (% erneuerbar)
Stahlbeton Stahlbeton (Normalbeton) frei Baustelle (VDI 4600) Transportbeton C20/25; 2365 kg/m ³ ; 2% Bewehrungsstahl (Ökobaudat)	2.434	1.177 (7%)	1.262 (17%)
Betonfertigteil Betonfertigteil (bewehrt) ab Werk (VDI 4600) 1.3.05 Betonfertigteil Decke 20cm ; 504 kg/m ² (Ökobaudat)	2.318	2.138 (4%)	1.234 (13%)
Ziegel Mauerziegel (LHZ) (VDI 4600) Mauerziegel, Durchschnitt (Ökobaudat)	2.468	1.867 (15%)	2.707 (17%)
Kalksandstein Kalksandstein	976	1.100 (4%)	1.202 (11%)
Glas Flachglas (VDI 4600) Fensterglas einfach (Ökobaudat)	14.255	18.243 (2%)	17.857 (4%)
Holz Schnittholz frei holzbearbeitenden Betrieb (VDI 4600) Schnittholz Fichte (Ökobaudat 2011) Nadelschnittholz getrocknet (Durchschnitt de) (Ökobaudat 2015)	7.184	24.454 (77%)	22.716 (92%)

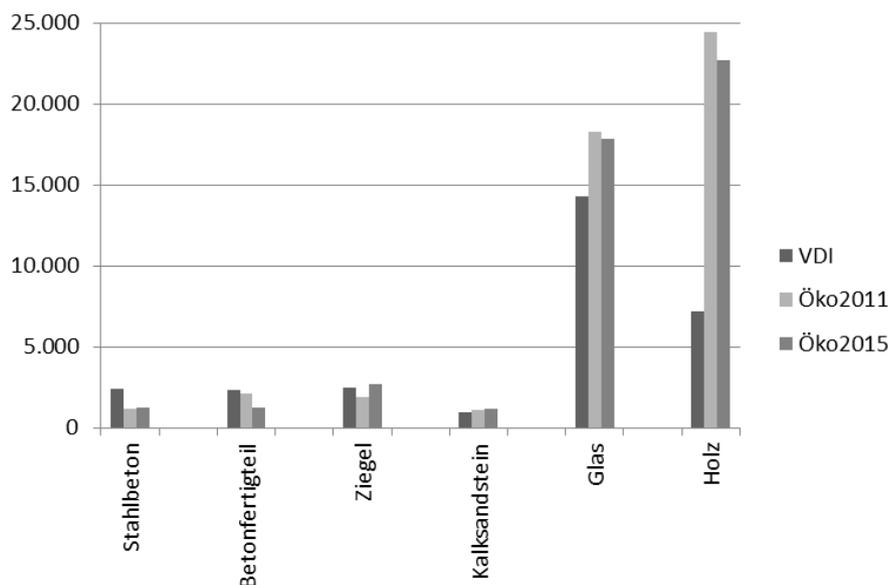


Abbildung 2-55: Kumulierter Primärenergieaufwand (erneuerbar und nicht erneuerbar) für die Herstellung nach VDI 4600, Ökobaudat 2011 und Ökobaudat 2015 in MJ/t im Vergleich (Eigene Darstellung)

Obwohl nicht klar definiert, ist dennoch die „Graue Energie“ im Zusammenhang mit Gebäuden ein derzeit sehr intensiv diskutiertes Thema. Der steigenden Bedeutung der in Gebäuden verbauten Energie liegt die Erkenntnis zugrunde, dass der Energieaufwand für die Herstellung eines Gebäudes umso relevanter wird, je energieeffizienter ein Gebäude im Betrieb ist. Dazu kommt, dass unter Umständen der Aufwand (Kosten, Energie, Umweltwirkungen) für Erstellung, Instandhaltung und Entsorgung eines sehr energieeffizienten oder Plusenergie-Gebäudes den Aufwand für den Gebäudebetrieb übersteigt.

Zusätzlich ist das Thema „Graue Energie“ in Bezug auf den Umgang mit dem Gebäudebestand von hoher Priorität, da durch den Umnutzung und Sanierung von bestehenden Gebäuden die in der Bausubstanz gespeicherte „Graue Energie“ weiter genutzt werden kann. Darüber hinaus besteht ein wachsendes öffentliches Interesse am Thema Nachhaltigkeit im Bauwesen, für dessen Bewertung die gesamtheitliche Betrachtung eine wichtige Rolle spielt.

Abbildung 2-56 zeigt die zunehmende Bedeutung der Bausubstanz in der gesamtenergetischen Bewertung. Insgesamt sinkt der Gesamtaufwand an Primärenergie mit zunehmender energetischer Qualität, bis hin zum tatsächlichen Plusenergiegebäude, dessen Erstellungsaufwand durch die Energieerzeugung am Gebäude über die Nutzungsdauer kompensiert wird. Gleichzeitig steigt aber der Anteil der Erstellung und Instandhaltung am Gesamtenergieaufwand: Bei einem Standardgebäude nimmt er je nach Energiestandard und Energieerzeugung nur einen kleinen Teil des Gesamtenergieaufwandes ein. Für ein Nullenergiegebäude, das keine (nicht erneuerbare) Energie im Betrieb benötigt, beträgt der Herstellungsaufwand fast 100% des Gesamtenergieaufwandes (abzüglich Aufwand für Instandhaltung und Rückbau). Daher gewinnt mit zunehmender angestrebter Energieeffizienz eines Gebäudes der KEA an Bedeutung.

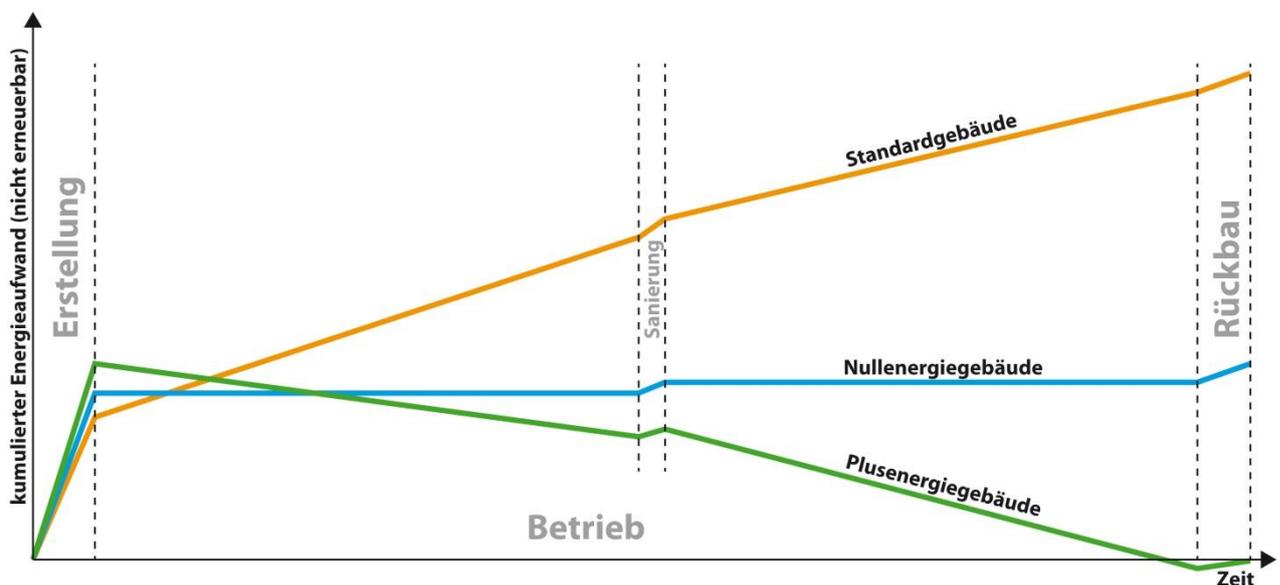


Abbildung 2-56: Kumulierter Energieaufwand (qualitativ) von Gebäuden mit unterschiedlichem energetischen Standard (Schneider, Pfoh & Grimm, 2015)

2.12.1.2 Ökobilanzen

Als ganzheitlicher Ansatz berücksichtigt die Ökobilanz nicht nur lokale Umweltwirkungen, die sich direkt auf die Nutzung des Gebäudes am Standort beziehen, sondern bezieht zusätzlich externe Wirkungen an anderen Orten mit ein. Dies geschieht dadurch, dass die Umweltwirkungen aller Gebäudekomponenten über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes aufsummiert werden. Bei dieser umfassenden Betrachtung

des Lebenszyklus eines Gebäudes werden alle Phasen zur Bewertung herangezogen, vom Abbau der Rohstoffe bis hin zum Abbruch des Gebäudes („Cradle to Grave“). Dabei wird auch der Transport der Materialien bis zur Fabrik mit einbezogen. Der Transport vom Hersteller der Bauprodukte zur Baustelle hingegen wird meist vernachlässigt, da es sich hier in der Regel um kurze Wege handelt, die in der Gesamtbilanz nur wenig zu Buche schlagen, und die stark standortabhängig sind. Insgesamt ergibt sich die größte Unschärfe in der Entsorgungsphase, da diese am weitesten in der Zukunft liegt und somit schwerer zu berechnen ist.

Für die Erstellung von Ökobilanzen von Gebäuden müssen eine Vielzahl von Normen beachtet werden. Diese sind in Tabelle 2-31 dargestellt.

Tabelle 2-31: Normative Grundlagen für die Ökobilanz (Eigene Darstellung)

DIN EN ISO 14001	Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2015
DIN EN ISO 14020	Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Allgemeine Grundsätze (ISO 14020:2000); Deutsche Fassung EN ISO 14020:2001
DIN EN ISO 14021	Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II) (ISO 14021:1999 + Amd 1:2011); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14021:2001 + A1:2011
DIN EN ISO 14024 DIN EN ISO 14024/A1	Umweltkennzeichnungen und -deklarationen (Umweltkennzeichnung Typ I) - Grundsätze und Verfahren (ISO 14024:1999); Deutsche Fassung EN ISO 14024:2000 (ISO 14024:1999/DAM 1:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14024:2000/prA1:2015
DIN EN ISO 14025	Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011
DIN EN ISO 14040	Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2009-11

Fortsetzung Tabelle 2-31:

DIN EN ISO 14044	Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006
DIN EN 15804	Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte (DIN EN 15804:2014-07); Deutsche Fassung EN 15804:2012+A1:2013
DIN EN 15978	Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode (DIN EN ISO 15978:2012-10); Deutsche Fassung EN 15978:2011

Eine wichtige Grundlage für die Erstellung einer Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder Gebäudes ist die Einteilung des Lebenszyklus in Phasen, die voneinander abgegrenzt sind und für eine vollständige Bilanz mit einbezogen werden müssen. Als Grobgliederung kann eine Einteilung in Erstellung, Nutzung und „End-of-Life“ oder Entsorgung eine Übersicht bieten (Abbildung 2-57).

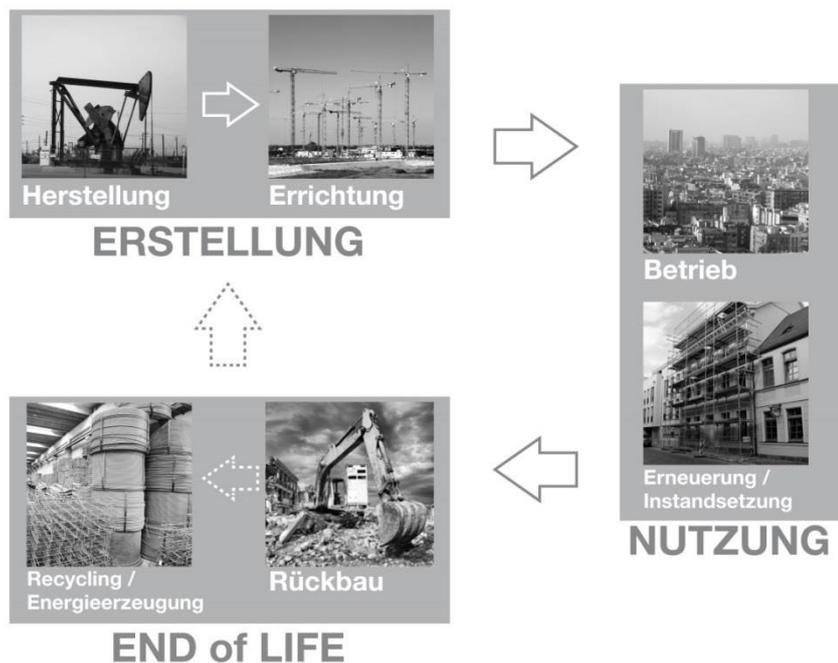


Abbildung 2-57: Lebenszyklus eines Gebäudes (Eigene Darstellung Bildquellen: oben links, oben rechts, unten links: Patricia Schneider; oben Mitte: (Wikimedia Commons, 2013b), unten rechts: (Deutsches Architektur Forum, o.J.), unten Mitte: (Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.), 2015, S.1)

Der gesamte Lebenszyklus von Gebäuden wird detailliert nach der Norm DIN EN 15978 in siebzehn einzelne Unterphasen eingeteilt (Abbildung 2-58). Diese Einteilung grenzt die einzelnen Schritte der Gebäudeerstellung, -nutzung und der Entsorgung klar voneinander ab. Für Ökobilanzen, die im Rahmen der BNB oder DGNB Zertifizierungssysteme durchgeführt werden, werden allerdings nur acht dieser Phasen mit

einbezogen. Alle anderen Phasen sind projektspezifisch und können nach derzeitigem Wissensstand noch schlecht abgeschätzt werden.

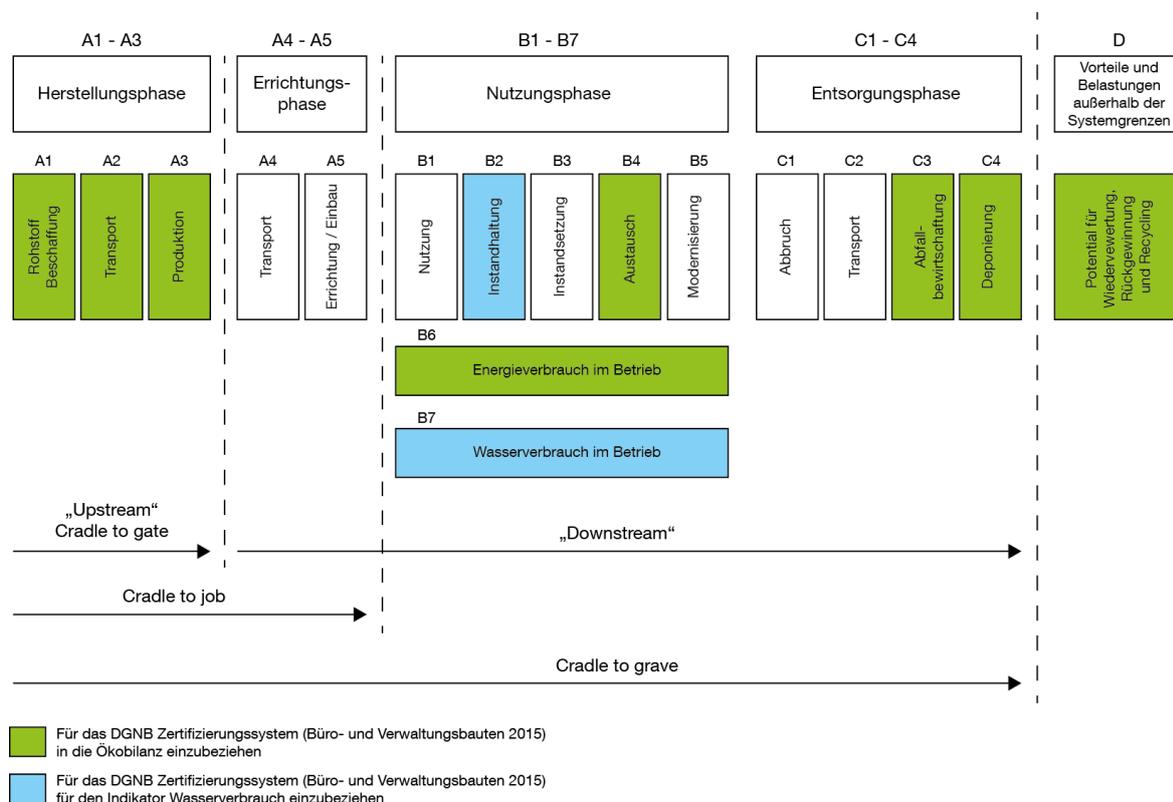


Abbildung 2-58: Gebäude-Lebenszyklus nach DIN EN 15978 (Eigene Ergänzungen nach Darstellung (DIN EN 15978, 2012))

Die Erstellung von Ökobilanzen (engl. Life Cycle Assessment: LCA) kann nach unterschiedlichen Methoden erfolgen. Die in Europa gängigste Methode ist die prozessbasierte LCA, bei der Energieverbrauch und Emissionen einzelner Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsschritte eines Produktes zu Gesamtwerten zusammengefasst werden.

Daneben werden, derzeit vorrangig in den USA und Australien, auch „Top-Down“-Methoden angewandt. Dabei werden Energieverbrauch und Emissionen nach Wirtschaftssektoren auf der Basis ökonomischer Vorgänge aufgeteilt. Die Gesamtwerte der Branchen werden anteilig auf Produkte oder Produktsysteme (z.B. Gebäude) aufgeteilt. Diese Methode soll sicherstellen, dass keine wesentlichen Einzelprozesse außer Acht gelassen werden. Sie hat den Nachteil, dass mit stark aggregierten Daten gearbeitet wird, so dass der Einfluss einzelner Entscheidungen für das individuelle Projekt nur sehr unzureichend analysiert werden kann.

Eine prozessbasierte Ökobilanz betrachtet die zur Herstellung und Entsorgung eines Produktes notwendigen Prozesse und analysiert den jeweils daraus resultierenden Energiebedarf und die Umweltwirkungen. Diese Prozesse werden über die Lebensdauer des Gebäudes hin betrachtet, die gegebenenfalls weit in die Zukunft reicht. Unterschiedliche Gebäude haben je nach ihrer Nutzung sehr unterschiedliche Nutzungszeiträume. Diese hängen unter anderem von Bauweise, Bauqualität, Installationsgrad und Änderungen von Nutzungsanforderungen ab (siehe Tabelle 2-32). Ein gängiger Betrachtungszeitraum, der in der Bewertung des Zertifizierungssystems der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) angewendet wird,

ist der Zeitraum von 50 Jahren. Um eine Vergleichbarkeit der Ökobilanz zwischen unterschiedlichen Gebäuden herzustellen, wird auch für die vorliegende Studie dieser Betrachtungszeitraum verwendet.

Tabelle 2-32: Nutzungszeiten von Gebäuden (VBS, 2007)

Gebäudefunktion	Maximale Nutzungszeiten bis zu einer umfassenden Neustrukturierung oder Aufgabe in Jahren
Industrie	20
Forschung	30
Lehre und Ausbildung	40
Gewerbe	40
Verwaltung	50
Wohnen	60

Grundlage für die Analyse der Umweltwirkungen eines Produktes ist die Stoffstromanalyse, die 1994 durch Friedrich Schmidt-Bleek eingeführt wurde. Hierbei werden alle zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes notwendigen Stoffströme aufsummiert und zu Materialintensitäten zusammengefasst (MIPS: Material Input pro Serviceeinheit). Letztere ergeben sich aus dem Verhältnis von aufgewendetem Material zu produziertem Material in Kilogramm Input zu Kilogramm Output. Die Materialien werden in abiotische Ressourcen, biotische Ressourcen, Boden, Wasser und Luft eingeteilt. Aus der MIPS-Analyse lassen sich die Materialintensitäten eines Produktes bzw. eines Bauwerkes ableiten. Ökologische Auswirkungen werden dabei nicht unterschieden.

Die Stoffstromanalyse dient als Grundlage für die Ökobilanz, in der dem Materialverbrauch verschiedene Umweltwirkungen zugeordnet werden. Der Rahmen zur Erstellung von Ökobilanzen ist in der DIN EN 14040 festgelegt (Abbildung 2-59). Diese Norm definiert die Ökobilanz als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Output Flüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ (DIN EN ISO 14040, 2006).

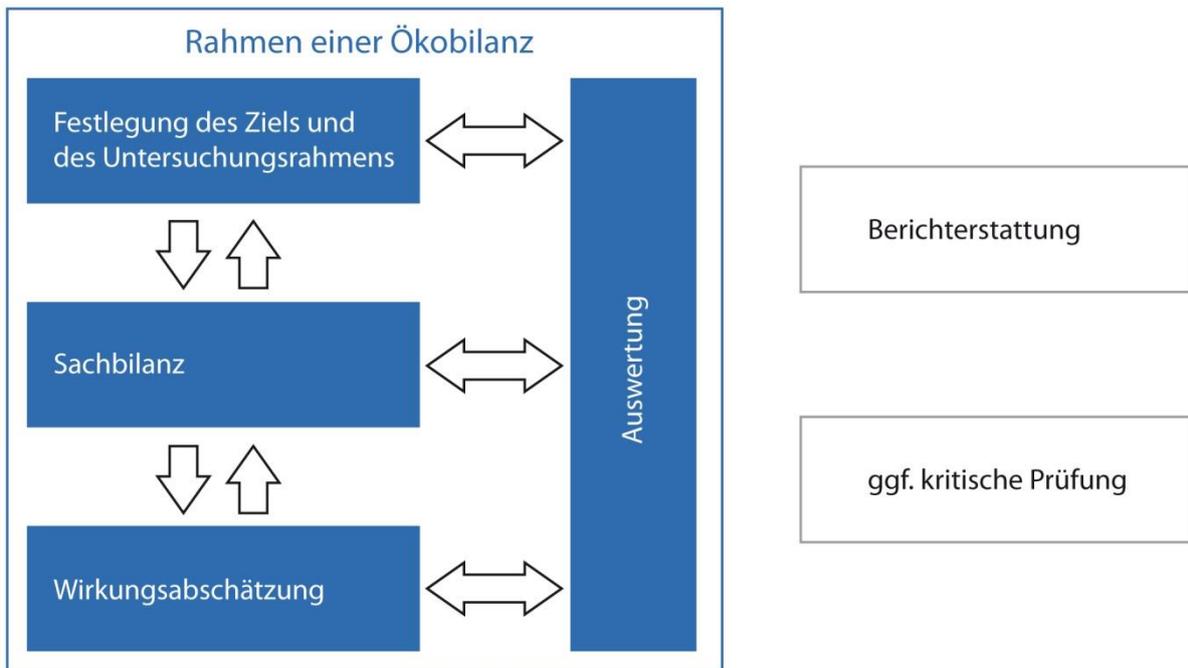


Abbildung 2-59: Erstellung von Ökobilanzen (Eigene Darstellung nach (DIN EN ISO 14040, 2006))

Eine Ökobilanz besteht aus vier Schritten, die voneinander abhängig sind und daher gegebenenfalls iterativ durchgeführt werden (siehe Richtungspfeile in Abbildung 2-59). Zunächst müssen Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Hier geht es um Fragestellungen wie: „Für welche Zielgruppe ist die Ökobilanz-Studie bestimmt?“, „Welche Systemgrenze wird der Bewertung zugrunde gelegt?“ oder „Auf welche funktionale Einheit bezieht sich das Ergebnis?“.

Die funktionale Einheit ist der „quantifizierte Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ (DIN EN 15804, 2014). Dies kann zum Beispiel die Fläche einer Außenwand in unterschiedlicher Konstruktion mit gleichem durchschnittlichen U-Wert sein oder eine Außenwandkonstruktion mit variabler Dämmqualität. Im letzteren Fall sollte der Energieverbrauch des Gebäudes in der Betriebsphase mit einbezogen werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen. Im Fall der vorliegenden Studie werden Bauteile in Bezug auf ihre Bauteilfläche verglichen, d.h. die funktionale Einheit ist 1m^2 Außenwandfläche, die jeweils äquivalenten Witterungsschutz und Brandschutz bietet. Da es sich bei dem Vergleich um Beispielgebäude handelt, war ein exakt gleicher U-Wert nicht immer sicherzustellen. Dennoch lohnt der Vergleich, da es sich zeigt, dass sich die Abweichung im U-Wert nicht im Ergebnis der Ökobilanz widerspiegelt (s. Kapitel 4.2.3). Daran ist zu erkennen, dass es bis zu einem gewissen Grad durch gezielte Baustoffwahl möglich wäre, gleichzeitig den Primärenergieaufwand für die Konstruktion und für den Gebäudebetrieb zu senken.

Bei einer vergleichenden Ökobilanz ist es außerdem für die Vergleichbarkeit essentiell, dass die Systemgrenzen einheitlich definiert sind. Durch die Elemente außerhalb der (zeitlichen oder räumlichen) Systemgrenze darf keine Verzerrung entstehen. Es dürfen aber Prozesse, die für alle Systeme gleich sind, gegebenenfalls vernachlässigt werden. Ein Beispiel hierfür wäre ein Vergleich zweier Einfamilienhäuser in unterschiedlicher Bauweise (z.B. Mauerwerk und Holz). Hierbei darf der Keller außen vor gelassen werden, wenn seine Bauweise in beiden Fällen gleich ist. Für die vorliegende Studie ist die zeitliche Systemgrenze der Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, die räumliche Systemgrenze die physischen Abmessungen der Außenwandteile.

Nach diesen Festlegungen folgt die Sachbilanz, die „die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ (DIN EN ISO 14040, 2006). Im Falle eines Gebäudes werden alle innerhalb der Systemgrenze liegenden Komponenten mit einbezogen und deren Inputs und Outputs summiert. Im Regelfall schließt die Sachbilanz zum Beispiel die Baustellenprozesse nicht ein, ebenso wenig wie den Planungsprozess. Alle relevanten Komponenten am Gebäude, wie zum Beispiel Tragwerk, Fassade, Innenausbau etc. werden betrachtet. Zu den Inputs eines Systems gehört auch die aufgewendete erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie. In der Sachbilanz wird unter anderem die Frage der „Nebenwirkungen“ eines Produktes und der Allokation von Inputs und Outputs bearbeitet. Hier geht es insbesondere um Koppelprodukte, wie zum Beispiel die Herstellung von Werkstoffen aus Abfallstoffen wie zum Beispiel Flugasche oder Holzspäne.

Basierend auf der Sachbilanz erfolgt die Wirkungsabschätzung: Diese ist der *„Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges des Produktes dient.“* Als die typischen fünf Wirkungskategorien der Umweltwirkungen werden im Leitfaden nachhaltiges Bauen des BMVBS genannt (BMVBS, 2013, S. 28):

- Treibhausgaspotenzial,
- Ozonschichtabbaupotenzial,
- Ozonbildungspotenzial,
- Versauerungspotenzial und
- Überdüngungspotenzial

Für die einzelnen Wirkungskategorien sind Referenz-Wirkstoffe festgelegt, alle anderen Stoffe werden über Charakterisierungsfaktoren umgerechnet. Beispielsweise wird für das Treibhauspotenzial Kohlendioxid als Referenzstoff verwendet. Methan, Stickoxid oder andere Stoffe mit Treibhauseffekt werden dementsprechend charakterisiert. Eine Einheit Methan hat zum Beispiel über 100 Jahre den 21-fachen Treibhauseffekt einer Einheit Kohlendioxid (UNFCCC, o.J.). Daher sind die Einheiten in Tabelle 2-33 jeweils in Äquivalenten angegeben.

Tabelle 2-33: Umweltwirkungskategorien (Eigene Darstellung unter Verwendung der DIN 15978, DIN 15804 und Ökobaudat)

Umweltwirkung	Wirkungskategorie (deutsch)	Wirkungskategorie (Englisch)	Abkürzung	Einheit
Globale Erwärmung	Treibhausgaspotenzial	Global Warming Potential	GWP	kg CO ₂ -Äqv.
Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht „Ozonloch“	Ozonschichtabbau-potenzial	Ozone Depletion Potential	ODP	kg R11-Äqv. [kg FCKW-Äqv.] [kg CFC11-eq.]
Bildung von bodennahem Ozon „Sommersmog“	Ozonbildungspotenzial	Photochemical Ozone Creation Potential	POCP	kg Ethen-Äqv. [kg C ₂ H ₄ eq.]
Versauerung von Boden und Wasser z.B. „saurer Regen“	Versauerungspotenzial	Acidification Potential	AP	kg SO ₂ -Äqv.
Überdüngung von Boden und Wasser z.B. „Algenblüte“	Eutrophierungspotenzial	Eutrophication Potential	EP	kg Phosphat-Äqv. [kg PO ₄ -Äqv.]
Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossile Energieträger)	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für fossile Brennstoffe	Abiotic Depletion Potential (fossil fuels) for fossil resources	ADPF	MJ
Verknappung von abiotischen Ressourcen (Stoffe)	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente	Abiotic Depletion Potential (elements) for non-fossil resources	ADPE	kg Sb-Äqv.

Die Auswertung ist der „Bestandteil der Ökobilanz, bei dem die Ergebnisse der Sachbilanz oder der Wirkungsabschätzung oder beide bezüglich des festgelegten Ziels und Untersuchungsrahmens beurteilt werden, um Schlussfolgerungen abzuleiten und Empfehlungen zu geben“ (DIN EN ISO 14040, 2006). Hier wird gegebenenfalls auch eine Gewichtung der Umweltwirkungen vorgenommen, da sich die Ergebnisse bezogen auf die unterschiedlichen Wirkungskategorien unterscheiden können.

Ökobilanzen werden, wie oben beschrieben, für festgelegte (Produkt-)Systeme erstellt: Ziel hierbei kann sein, die Umweltwirkungen alternativer Systeme zu vergleichen, um eine Auswahl zu treffen. Eine Ökobilanz kann außerdem dazu dienen, den Herstellungs- oder Entsorgungsprozess eines Produktsystems zu optimieren, wenn die Umweltwirkungen einzelner Produktionsschritte analysiert werden. Ökobilanzen von Gebäuden dienen im Regelfall dazu, unterschiedliche Ausführungsvarianten zu vergleichen. Daher ist immer ein Vergleichssystem erforderlich, dessen Umweltwirkungen in Bezug zum betrachteten System gesetzt werden können. Für den Vergleich unterschiedlicher Holzrahmenbau-Wände wurden verschiedene Standard-Wandaufbauten als Vergleichssysteme herangezogen: Drei Außenwände in Massivbauweise und eine Aluminium-Vorhangfassade (siehe Kapitel 4.2.3). Alle Fassaden sind opak, so dass kein solarer Eintrag oder unterschiedliche Tageslichtversorgung berücksichtigt werden müssen.

2.12.1.3 End-of-Life Szenarien

Das Ende der Nutzungsdauer von Gebäuden wird oft nicht betrachtet, wenn „Graue Energie“ oder Umweltauswirkungen der Gebäudeerstellung untersucht werden. Ein Grund hierfür ist die im Vergleich zur Herstellungsphase relativ große Unsicherheit in der End-of-Life-Phase, da diese aufgrund der langen Nutzungsdauer von Gebäuden weit in der Zukunft liegen kann.

Für eine vollständige Ökobilanz wird das Ende der Nutzungsdauer eines Gebäudes analysiert, d.h. die Umweltauswirkungen des Abbruchs und des Abbruchmaterials werden berechnet. Im Regelfall, wie zum Beispiel für eine Zertifizierung nach DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) oder BNB (Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen), werden die Abbruchprozesse und der Transport von der Baustelle zur Deponie oder Aufbereitung nicht betrachtet (s. *Abbildung 2-58*). Gutschriften aus Energiegewinnung von Reststoffen oder Recyclingpotenzial werden für das DGNB-System gesondert ausgewiesen, im BNB-System dagegen derzeit nicht bewertet. Stoffe, die bereits vollständig aus Sekundärmaterial bestehen, erhalten für das Recycling keine weitere Gutschrift.

Für die Entsorgung der Bauteile und Bauteilschichten werden End-of-Life Szenarien festgelegt, die sich nach dem derzeit gängigsten Szenario der Entsorgung oder des Recyclings der Bauteilgruppen richten. Die für diese Studie verwendeten Szenarien orientieren sich am DGNB-System.

Tabelle 2-34: Entsorgungsszenarien nach DGNB (Eigene Darstellung nach (DGNB, 2015a))

Baustoff	Entsorgungsszenario	Beispiel
Metalle zur Verwertung	Recycling/Verwertung: Recyclingpotenzial	Aluminium
Mineralische Baustoffe zur Verwertung	Recycling/Verwertung: Bauschutttaufbereitung	Kalksandstein
Materialien zur thermischen Verwertung (mit einem Heizwert, z. B. Holz, Kunststoffe etc.)	Thermische Verwertung	Konstruktionsvollholz
Materialien, die nur auf Deponien abgelagert werden	Entsorgung auf Deponie	Mineralwolle

Die Berechnung der Umweltwirkungen durch End-of-Life-Szenarien von Baustoffen stellt keine Information darüber bereit, ob ein Gebäude gut oder schlecht rückbaubar ist. Da der Demontageaufwand nicht bilanziert wird, können die Ergebnisse der Ökobilanz für die Entsorgungsphase nur darüber informieren, inwieweit die im Gebäude verbauten Rohstoffe bei ihrer Verwertung ein Wertstoff sind, also ob zum Beispiel Recyclingpotenzial oder Energiegutschriften angerechnet werden können. Die Ergebnisse informieren auch darüber, ob bei der Abfallbehandlung oder Deponierung weitere Umweltlasten anfallen. Rückbaubarkeit und Demontierbarkeit des Gebäudes müssen gesondert untersucht werden. (siehe Kapitel 2.12.2.2)

2.12.1.4 Verwendete Datenbanken

Für die Erstellung von Ökobilanzen stehen weltweit eine Vielzahl von Datenbanken zur Verfügung, die Informationen über Umweltwirkungen von Prozessen und / oder Produkten bereitstellen. Für die vorliegende Studie wurde die Ökobaudat (BMUB, o.J.) verwendet. Diese Datenbank wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, o.J.) zur Verfügung gestellt. Sie ist öffentlich und kostenlos zugänglich und enthält ca. 700 Datensätze zu Baustoffen und Prozessen.

Andere Datenbanken, wie zum Beispiel die Schweizer Datenbank ecoinvent (ecoinvent, o.J.) oder die österreichische Datenbank baubook (IBU, o.J.) des IBO (Institut für Bauen und Umwelt) enthalten ebenfalls zahlreiche Werte zu Baustoffen. Studien zeigen allerdings, dass Ergebnisse aus Ökobilanz-Berechnungen, deren Grundlage unterschiedliche Datenbanken darstellen, in ihren absoluten Werten und oft auch in den festzustellenden Tendenzen nicht vergleichbar sind, da vielfach unterschiedliche Rechenverfahren gewählt werden oder andere Randbedingungen zugrunde liegen (z.B. landesspezifischer Energiemix) (Sölkner, 2014). Eine Mischung unterschiedlicher Datengrundlagen ist also unbedingt zu vermeiden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen.

In diesem Projekt wurde mit der Ökobaudat 2011 gerechnet, da alle verfügbaren Werkzeuge noch diese Datenbankversion zugrunde legen. Für die Ökobaudat 2011 ist der Lebenszyklus eines Bauproduktes in folgende Phasen unterteilt (PE International, 2011):

1. Herstellung des Bauproduktes inklusive der Herstellung aller relevanten benötigten Materialien / Energie
2. Nutzung des Bauproduktes
3. Nachnutzungsphase

Die wichtigste Änderung in späteren Versionen (ab 2013) der Ökobaudat ist die Einteilung der Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15804 (Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte) (Abbildung 2-60), so dass die Module A1-A3 und C3, C4 und D einzeln ausgewiesen werden. Zusätzlich wurden weitere Umweltindikatoren eingeführt, wie zum Beispiel das Ressourcenabbau-potenzial für fossile Brennstoffe. Des Weiteren wurden die Sicherheitszuschläge auf Hersteller-Datensätze überarbeitet und zum Teil auf bis zu 30% erhöht (PE International, 2013).

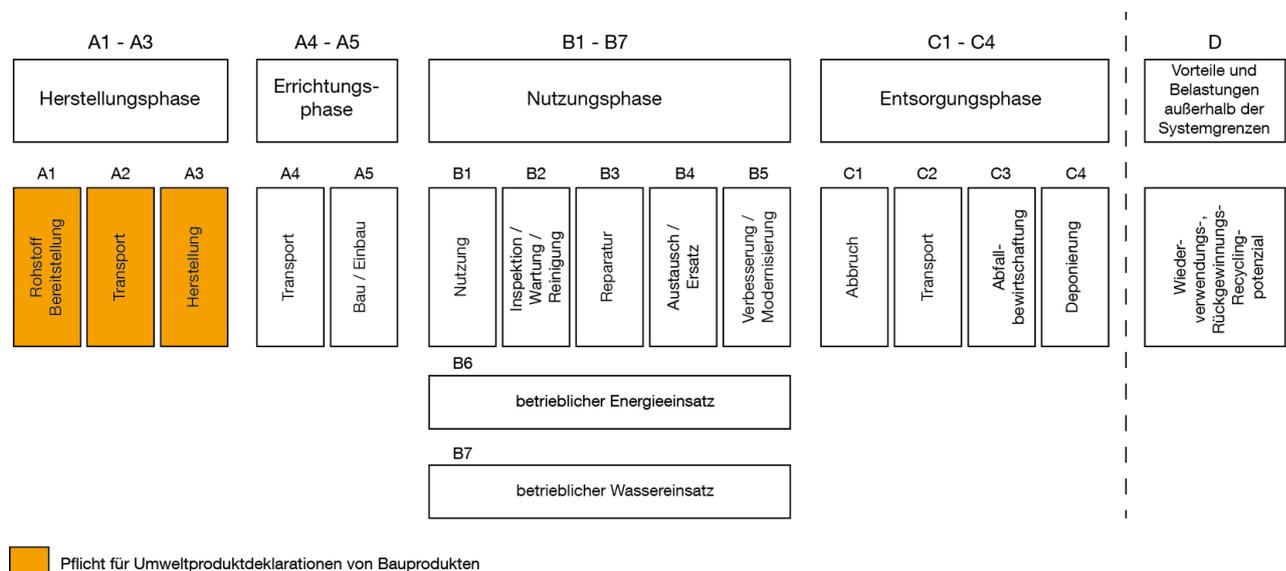


Abbildung 2-60: Lebenszyklusphasen eines Bauproduktes nach (DIN EN 15804, 2014)

Es ist also auch zu erwarten, dass sich die Ergebnisse der Ökobilanzen, die mit Hilfe der Ökobaudat 2015 gerechnet werden, im Vergleich zur Ökobaudat 2011 sichtbar verändern. Dies wird im Kapitel 4.2.3 in einer Beispielrechnung untersucht.

2.12.1.5 Umweltwirkungen von Gebäuden

Zahlreiche Studien belegen, dass Gebäude in Holzbauweise insgesamt einen geringeren Primärenergieinhalt aufweisen und weniger CO₂-Emissionen verursachen als Gebäude in Stahlbeton- oder Mauerwerksbauweise. Beispielsweise weist H. König für eine Studie im Jahr 2014 nach, dass ein Gebäude in Holzbauweise nur 52% bis 82% der nicht erneuerbaren Primärenergie eines Gebäudes in Standardbauweise verbraucht und 29% bis 69% des Treibhauspotenzials verursacht (König, 2014, S. 106-107) (Abbildung 2-61).

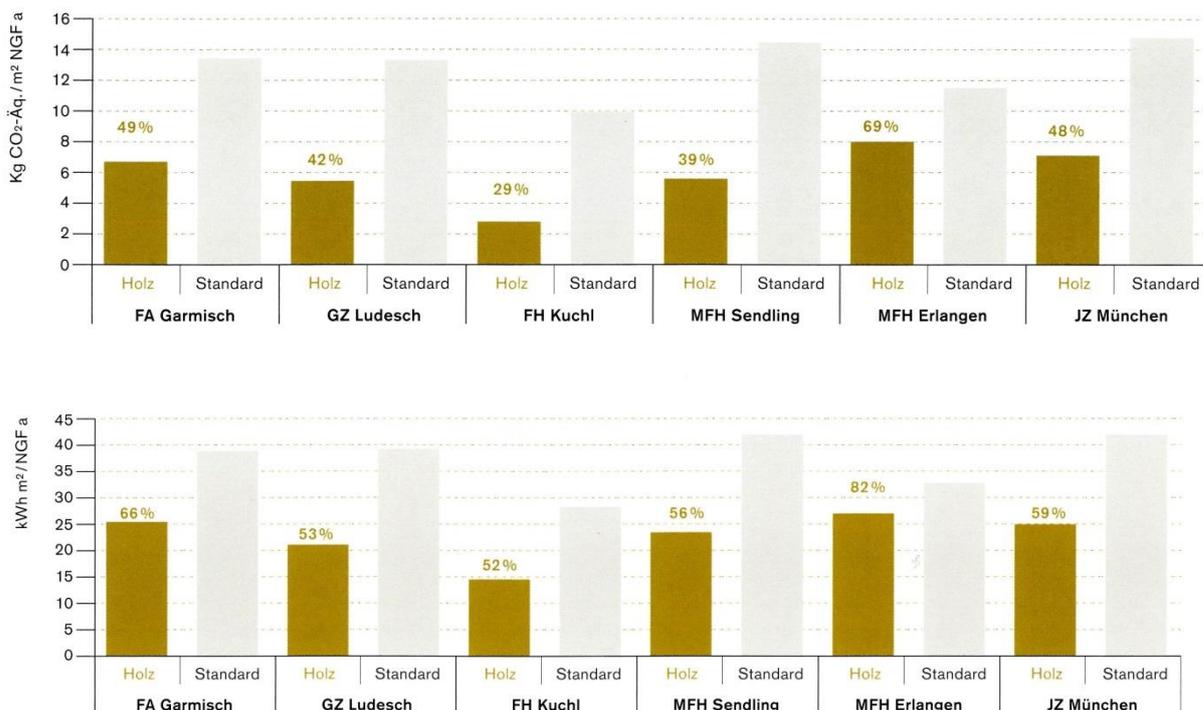


Abbildung 2-61: Vergleich Gesamtbilanz Treibhauspotenzial (oben) und nicht erneuerbare Primärenergie (unten) an sechs Gebäudebeispielen, Betrachtungszeitraum 50 Jahre (König, 2014, S. 106-107)

Von allen Gebäudeteilen verursacht i.d.R. das Tragwerk die höchsten Kosten, benötigt am meisten Herstellungsenergie und hat das höchste Treibhauspotenzial (El khouli, 2014), darauffolgend in abnehmender Reihenfolge die Gebäudehülle, der Innenausbau und die Gebäudetechnik. Die Anteile der Gebäudeteile am Gesamtergebnis können je nach Betrachtungsweise allerdings stark schwanken. Wird nur die Herstellung betrachtet, haben Konstruktionen mit hohen Gutschriften einen Nachteil gegenüber Konstruktionen, die Lasten in der Entsorgungsphase verursachen. Auch ist die Schnittstelle zwischen Tragwerk und Hülle nicht immer eindeutig definiert. Wenn ein Bauteil gleichzeitig tragend und umschließend ist (Außenwand, Dach, Bodenplatte), müssen die einzelnen Schichten für die Gesamtbilanz jeweils dem Tragwerk oder der Hülle zugeordnet werden, um eine eindeutige Abgrenzung zu erhalten.

Darüber hinaus kann sich je nach Bauweise und Kompaktheit des Gebäudes das Verhältnis der „Grauen Energie“ und des Treibhauspotenzials der einzelnen Gebäudeteile zueinander sehr stark verändern. In Tabelle 2-35 sind die Verhältnisse aus mehreren am Lehrstuhl ENPB erstellten Studien von Gebäudehülle (Außenwände und Dach) zu Tragwerk gegenübergestellt. Es handelt sich bei den großen Mehrfamilienhäusern der Gebäudeklasse 5 um das Projekt wagnisART in München, deren Tragwerk aus Stahlbeton besteht, während die Fassade in Holzrahmenbauweise erstellt wurde. Die Mehrfamilienhäuser der Gebäudeklasse 3 sind ein Projekt der Krämmel Wohn- und Gewerbebau GmbH („Städtischer Hartplatz Penzberg“), deren Tragwerk ebenfalls ein Stahlbetontragwerk ist. Das Haus in Massivbauweise besitzt Außenwände aus Ziegelmauerwerk, das Haus in Hybridbauweise Außenwände in Holzrahmenbauweise.

Tabelle 2-35: Verhältnis der Ökobilanzergebnisse Tragwerk zu Gebäudehülle für Mehrfamilienhäuser

Gebäudetyp	Verhältnis Tragwerk : Gebäudehülle			
	PE n. ern. Herstellung	PE n. ern. Herstellung + Erneuerung + Entsorgung (inkl. Gutschriften)	GWP Herstellung	GWP Herstellung + Erneuerung + Entsorgung (inkl. Gutschriften)
Mehrfamilienhaus				
Hybridbauweise GKI5	1,2 : 1	3,7 : 1	9,9 : 1	2,2 : 1
Mehrfamilienhaus				
Massivbauweise GKI3	1,4 : 1	1,7 : 1	1,7 : 1	1,7 : 1
Mehrfamilienhaus				
Hybridbauweise GKI3	1,7 : 1	2,8 : 1	3,3 : 1	2,2 : 1

Erstens wird hier die Tatsache bestätigt, dass das Tragwerk mehr nicht erneuerbare Primärenergie erfordert und mehr Treibhauspotenzial verursacht als die Gebäudehülle (um das 1,2- bis 9,9-fache). Zweitens kann man erkennen, dass bei einem Gebäude in Massivbauweise die Ergebnisse für Hülle und Tragwerk näher zusammen liegen (1,4 bis 1,7-fach). Dies ist aus der Tatsache zu begründen, dass die Außenhülle mehr Primärenergie enthält und mehr Treibhauspotenzial verursacht als bei einem Gebäude in Hybridbauweise. Drittens fällt die Verschiebung auf, die sich im Fall der Hybridbauten bei der Erweiterung der Systemgrenze über die Herstellung auf Erneuerung und Entsorgung ergibt, da Holz und Holzwerkstoffe in der Entsorgungsphase Primärenergie-Gutschriften, aber CO₂-Lasten erhalten.

An den oben beschriebenen Mehrfamilienhäusern in Massiv- und Hybridbauweise wurde nachgewiesen, dass Tragwerk und Hülle der Hybridbauweise im Vergleich zur Massivbauweise insgesamt 13% weniger nicht erneuerbare Primärenergie verbrauchen und 7% weniger Treibhauspotenzial verursachen (TUM, 2015)

Wird der ganze Lebenszyklus in die Betrachtung mit einbezogen, zeigt sich ein weiterer Vorteil der Hybridbauweise: Die Holzrahmenbau-Fassaden haben insgesamt wesentlich bessere U-Werte bei gleicher Wandstärke (s. auch Vergleichsfassaden Kapitel 4.2.3). Bei gleichen Außenmaßen des Gebäudes ergeben sich daher eine größere Nutzfläche und ein geringerer Heizwärmebedarf für Gebäude in Hybridbauweise. Über den Lebenszyklus bedeutet dies weitere Primärenergie- und CO₂-Einsparungen und verringerte Umweltwirkungen.

2.12.2 Rezyklierbarkeit und Demontierbarkeit von Fassadensystemen

„Alle Bemühungen müssen letztlich darauf abzielen, Erzeugnisse zu schaffen, die im gesamtwirtschaftlichen Sinn optimal sind. Daraus ergibt sich zwingend die Notwendigkeit, die Schlussphase der Produktlebensdauer nach dem Ende des Produktgebrauches systematisch in die Betrachtung mit einzubeziehen, damit die im Erzeugnis enthaltenen Wertstoffe zurückgewonnen werden können.“ (Weege, 1981, S. V) Dieses Zitat aus dem Jahre 1981 zeigt die schon vor 30 Jahren geführte Diskussion um die Wiedergewinnung von Rohstoffen aus Abfall, die in der Idee der Kreislaufwirtschaft mündet. In diesem Zusammenhang wurde im Jahr 1996 in Deutschland das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erlassen, das im Jahr 2012 zum Kreislaufwirtschaftsgesetz novelliert wurde.

Da das Bauwesen einen großen Teil der Energie und Rohstoffe in Deutschland verbraucht – ca. 90% aller mineralischen Rohstoffe werden jährlich zur Herstellung von Baustoffen und -produkten verwendet (ProgRess, 2015) – fokussiert man sich zunehmend auf in der Baubranche anwendbare Recyclingkonzepte. Hierbei sind grundsätzlich zwei Gebiete zu unterscheiden: Zum einen die Entwicklung von Konzepten für bestehende Gebäude, die saniert oder abgerissen werden, um die in den Gebäuden bereits verbauten Rohstoffe weiter nutzbar zu machen. Zum anderen Planungs- und Ausführungskonzepte für Neubauten, die recycelte Baustoffe nutzen und gleichzeitig eine spätere Weiternutzung möglichst aller verbauten Ressourcen ermöglichen. Das folgende Kapitel befasst sich vornehmlich mit Konzepten für den Neubau, um das Potenzial der Anwendung von Hybridbauweisen darzustellen.

2.12.2.1 Lebensdauer und Austauschzyklen

Die einzelnen Teile eines Gebäudes können in Nutzungs-Gruppen mit entsprechender Nutzungsdauer eingeteilt werden (Abbildung 2-62). Dabei ist es sinnvoll, dass die einzelnen Nutzungsgruppen unabhängig voneinander erneuert werden können. Ist zum Beispiel das Tragwerk unauflösbar mit der Fassade verbunden, oder die Fassade Teil des Tragwerks, ist ein Austausch der Fassade nahezu unmöglich, ohne das Tragwerk in Mitleidenschaft zu ziehen. Die Fassade ist nach diesem Schema nach dem Tragwerk die Nutzungsgruppe mit der zweitlängsten Lebensdauer.

Hybridbauweisen können in dieser Hinsicht Vorteile bieten, da die Nutzungsgruppe „Fassade“ zunächst ein vom Tragwerk unabhängiges Element darstellt. Um eine spätere Austauschbarkeit zu gewährleisten, muss allerdings außerdem die Verbindung Fassade / Tragwerk so beschaffen sein, dass sie mit geringem Aufwand zu lösen ist (s. auch 2.12.2.2).

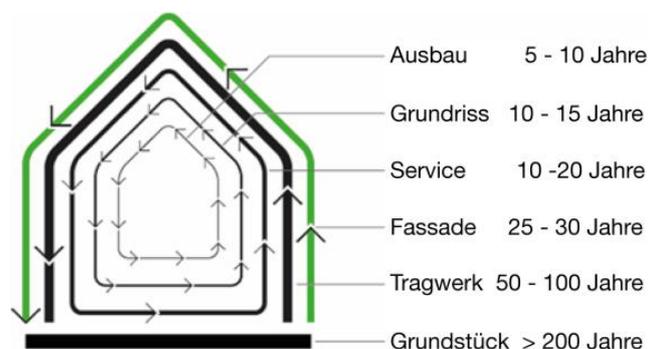


Abbildung 2-62: Nutzungsgruppen und Austauschzyklen nach (Brand, 1994)

Hinzu kommt, dass einzelne Bauteilschichten unterschiedlich lange Lebensdauern besitzen können. Die tatsächliche Lebensdauer eines Bauteils oder einer Bauteilschicht kann stark von der durchschnittlichen Lebensdauer abweichen, da sie von vielen Faktoren abhängt, nicht zuletzt von der Qualität der Bauausführung. Bei der Planung ist für eine gute Rezyklierbarkeit darauf zu achten, dass Bauteilschichten mit kürzerer Lebensdauer ausgetauscht werden können, ohne dass dabei Bauteilschichten mit längerer Lebensdauer beeinflusst werden. In vielen Fällen ist dies allerdings nicht möglich, wie zum Beispiel die unterschiedlichen Annahmen für Fensterrahmen und Verglasung der Tabelle 2-36 belegen.

Tabelle 2-36: (links) Auszug aus Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten (BBSR, 2001, Anlage 6) (rechts) Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen (BBSR, 2011)

Bauteil / Bauteilschicht 2001	Lebenserwartung von _ bis _ [Jahre]	mittlere Lebenserwartung (2001) [Jahre]	Bezeichnung 2011	Nutzungsdauer (2011) [Jahre]
Außenwände / -stützen (Tragkonstruktion)				
Beton, bewehrt, bewittert	60 - 80	70	Betonwand	≥ 50
Ziegel, Klinker, bewittert	80 - 150	90	Mauerwerkswand	≥ 50
Beton, Betonstein, Ziegel, Kalksandstein, bekleidet	100 - 150	120		≥ 50
Stahl	60 - 100	80	Stahlbauwand	≥ 50
Weichholz, bekleidet; Hartholz, bewittert	60 - 80	70	Holzwand	≥ 50
Hartholz, bekleidet	80 - 120	100		≥ 50
Außenwände, Verblendung, Ausfachung (Nichttragende Konstruktion außen)				
Beton - bewittert	60 - 80	70	Bekleidungen: Naturstein, (...) Betonsteinplatten)	≥ 50
Naturstein, bewittert	60 - 250	80		
Weichholz, bewittert	40-50	45	Holzbekleidung: Nadelholz unbehandelt	30
Hartholz, bewittert	60-80	70	Holzbekleidung: Nadelholz, behandelt, Laubholz...	40
WDVS	25 - 45	30	Wärmedämmverbundsystem	40
Außentüren, -fenster				
Rahmen, Flügel Kunststoff	40 - 60	50	Fenster (Rahmen und Flügel): Kunststoff, Nadelholz unbehandelt	40
Rahmen, Flügel Weichholz	30 - 50	40		
Verglasung, Abdichtung: Mehrscheiben-Isolierglas	20 - 30	25	Verglasung: (...) 3-Scheiben-Wärmeschutzglas, (...)	30

Angenommene Lebensdauern von Bauteilen nehmen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz, da der Austausch von Bauteilschichten bilanziert werden muss, wenn die Lebensdauer der Schicht kürzer ist als der Betrachtungszeitraum.

2.12.2.2 Betrachtungsebenen

Parallel zu den Detaillierungsebenen bei der recyclingorientierten Produktentwicklung (Tabelle 2-37) sind auch bei der Untersuchung der Qualität eines Gebäudes in seiner End-of-Life Phase drei Ebenen relevant:

- Das Gebäude („Produkt“)
- Die Bauteile
- Die Baumaterialien

Zusätzlich können die Bauteile in Nutzungsgruppen zusammengefasst werden (s. *Abbildung 2-62*). Auf jeder Ebene wird die Rezyklierbarkeit des Gebäudes beeinflusst. Die Eigenschaften der jeweils höheren Detaillierungsebene sind Voraussetzung für die Eigenschaften der darunterliegenden Ebene: Ist das Gebäude einfach und schnell in seine Nutzungsgruppen und Bauteile zerlegbar, wird auch die Trennung der einzelnen Bauteilschichten erleichtert. Können die Bauteilschichten sortenrein voneinander getrennt werden, ist die Verwertung der Baumaterialien möglich.

Tabelle 2-37: Zuordnung Produkt-Detaillierungsgrad zu den jeweiligen recyclingrelevanten Konstruktionsaspekten (VDI 2243, 2002)

Detaillierungsebenen und - grad	Baustruktur	Verbindungen	Werkstoffe
<i>Allgemein</i>	Recyclingkonzept	Lösbarkeit	Recyclingfähigkeit
<i>Produktspezifisch</i>	Modularer Aufbau	Verbindungsarten, -vielfalt	Verwertungskompatibilität
<i>Bauteilspezifisch</i>	Zugänglichkeit	Demontagetiefe, -zeit	Materialvielfalt
<i>Materialspezifisch</i>	Separierbarkeit	Demontagezeit	Materialauswahl, -verträglichkeit

Recycling- und Rückbaufähigkeit von Gebäuden sind auch in Zertifizierungssystemen zum nachhaltigen Bauen, wie dem DGNB- oder BNB-System, ein Thema. In beiden Systemen gehört dieses Kriterium zur Beurteilung der Technischen Qualität. Das DGNB-System unterscheidet zwischen konstruktiver (Gebäude und Bauteile) und stofflicher (Baumaterialien) Ebene, das BNB-System zwischen Rückbaufähigkeit, Sortenreinheit und Verwertbarkeit.

Für die Betrachtung auf der Ebene der Konstruktion spielen die Verbindungen zwischen Nutzungsgruppen, Bauteilen und Bauteilschichten die entscheidende Rolle. Unterschieden werden lösbare und permanente Verbindungen. Für eine gute Demontierbarkeit und sortenreine Trennung sind lösbare Verbindungen Voraussetzung. In der in dieser Studie betrachteten Hybridbauweise werden für die Verbindung zwischen Stahlbeton-Tragwerk und Holzrahmenbauelement geschraubte Verbindungen eingesetzt, die eine im Vergleich zur Massivbauweise sehr einfache Demontage der Fassaden-Elemente ermöglichen. Die Fassaden-

elemente erlauben damit einen Transport zu Aufbereitungsunternehmen oder Werkstätten, so dass die Trennung der Schichten nicht zwingend auf der Baustelle erfolgen muss.

Inwieweit sich daraufhin die Materialgruppen sortenrein voneinander trennen lassen, hängt vom Aufbau des Elementes ab. Für die Verbindung der Bauteilschichten im Kernelement und in der Installationsebene werden Nägel oder Schrauben eingesetzt, jeweils lösbare Verbindungen.

Eine mögliche Problemstelle ist die luftdichte Ebene: Für die Montage von Dampfbrems-Folien werden Klammern eingesetzt, die nur mit etwas größerem Aufwand lösbar sind. Im Bereich der Anschlüsse und für die Verklebung der OSB-Platten untereinander, wenn diese die Dampfbremse bilden, kommen meist Klebebänder, also permanente Verbindungen zum Einsatz, die auf den Bauteilschichten haften. Im Vergleich zu vor Ort hergestellten verputzten Massivaußenwänden weisen die vorgehängten Fassadenelemente den Vorteil auf, dass die Schichten nicht permanent miteinander verbunden, d.h. grundsätzlich sortenrein trennbar sind.

Bei den Außenwandbekleidungen bieten die hinterlüfteten Bekleidungen den Vorteil, dass sie ebenfalls mit lösbaren Verbindungen (Schrauben oder Clips) befestigt und somit einfach demontierbar sind. Wärmedämmverbundsysteme dagegen werden aufgeklebt. Möglichkeiten der unaufwendigen Ablösung des WDVS von seinem Untergrund und der sortenreinen Trennung von Dämmstoffen und Putz existieren derzeit nicht auf dem Markt. Daher ist ein Wärmedämmverbundsystem in Bezug auf die Trennbarkeit der Schichten nicht zu empfehlen.

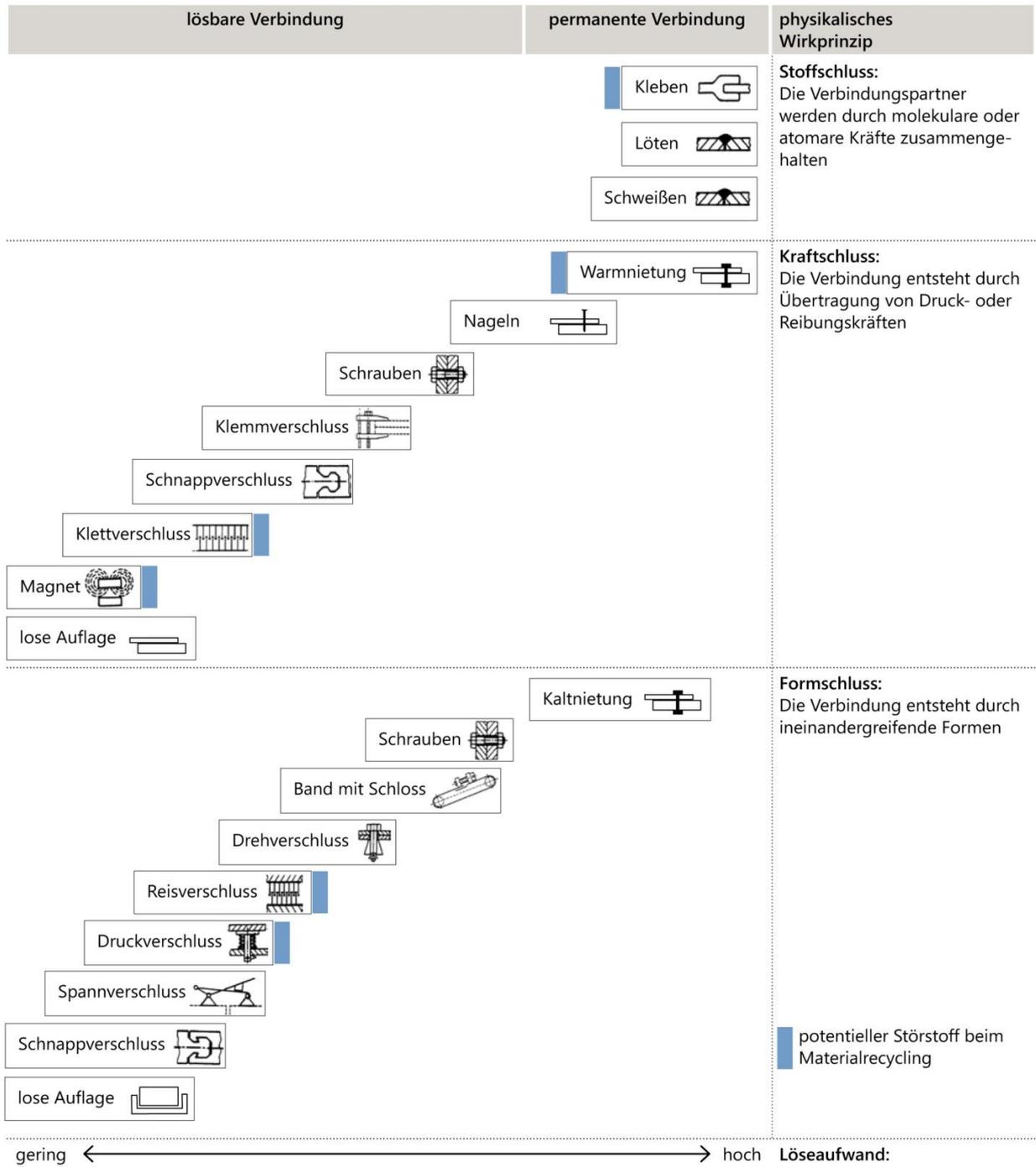


Abbildung 2-63: Bauteilverbindungen - Kategorisierung nach Wirkprinzipien und Lösbarkeit (Brenner, 2010)

Auf Materialebene werden die Möglichkeiten des Recyclings der einzelnen Stoffe betrachtet. Für die Berechnung der Ökobilanz werden die Recyclingpotenziale der Materialien addiert, d.h. Trennbarkeit und Sortenreinheit werden angenommen. Für die End-of-Life Szenarien der Materialien werden unterschiedliche Qualitäten unterschieden. Hier sind zunächst die Begriffe des Up-Cycling und Down-Cycling zu nennen.

Down-Cycling bedeutet das Recycling eines Stoffes zu einem Material geringerer Qualität. Ein Beispiel hierfür wäre die Verwendung von aufbereitetem Betonbruch als Füllmaterial für Straßen zu nennen. Ein Up-Cycling, also die Verwendung eines Abfall-Materials zu einem höherwertigen Zweck, tritt im Bauwesen

nur selten auf. Eine Verwendung von sandgefüllten Kunststoff-Wasserflaschen für die Erstellung von Häusern ist ein solches Beispiel.

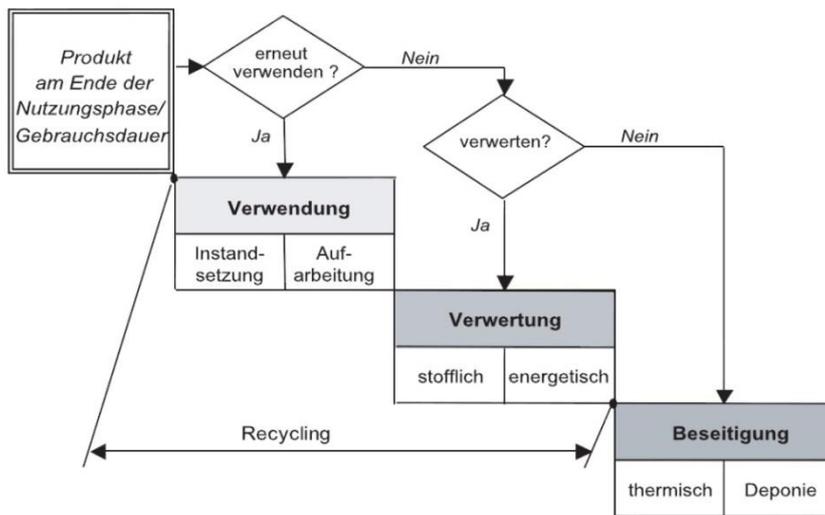


Abbildung 2-64: Recycling-Kaskade nach (VDI 2243, 2002)

Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „Recycling-Kaskade“, d.h. einer Wertung verschiedener End-of-Life-Szenarien in absteigender Qualität. Weniger aufwendige Prozesse (bzgl. Energiebedarf, Technikaufwand), die zu gleich- oder höherwertigen Produkten führen, werden höher eingestuft als energie- und technologisch aufwendige Prozesse, die zu minderwertigeren Produkten führen. (Abbildung 2-64). Die höherwertigen Prozesse werden als „Verwendung“, minderwertigere Prozesse als „Verwertung“ bezeichnet. Ist das Material nicht mehr nutzbar, spricht man von „Beseitigung“.

Analog dazu unterscheidet die DGNB drei Stufen der Recyclingfreundlichkeit von Baustoffen. Wieder- und Weiterverwendung und Wiederverwertung zu einem gleichwertigen Produkt werden höher eingestuft (Stufe A) als eine Weiter- oder Wiederverwertung zu einem hochwertigen Bauprodukt (Stufe B). Energetische Verwertung wird in Stufe „Standard“ eingestuft. (DGNB, 2015b)

Tabelle 2-38: Stufen des Recyclings (Eigene Darstellung nach (BMUB, ByAK, o.J))

Wiederverwendung	Weiterverwendung
Beibehaltung der Produktgestalt: Erneute Nutzung des gebrauchten Produkts für den gleichen Verwendungszweck	Beibehaltung der Produktgestalt: Erneute Nutzung des gebrauchten Produkts für einen anderen Verwendungszweck
Beispiel: Fenster, Türen	Beispiel: Wände aus gebrauchten PET-Flaschen
Wiederverwertung	Weiterverwertung
Auflösung der Produktgestalt: Wiederholter Einsatz von Altstoffen (...) in einem gleichartigen wie dem bereits durchlaufenen Produktionsprozess. Durch Wiederverwertung entstehen aus den Ausgangsstoffen weitgehend gleichwertige Werkstoffe.	Auflösung der Produktgestalt: Einsatz von Altstoffen (...) in einem von diesen noch nicht durchlaufenen Produktionsprozess. Durch Weiterverwertung entstehen Produkte mit neuen bzw. anderen Eigenschaften und / oder anderer Gestalt, sogenannte Sekundärwerkstoffe.
Beispiel: Recycling-Stahl	Beispiel: Parkbänke aus Altkunststoffen

Da Außenwandelemente in Holzrahmenbauweise, wie oben beschrieben, relativ einfach vom Tragwerk demontierbar sind, wäre eine Aufbereitung und Wiederverwendung als Fassadenelemente durchaus denkbar. Wahrscheinlicher ist allerdings die Wiederverwendung einzelner Bestandteile, zum Beispiel der Fassadenbekleidung oder der Kernelemente, an anderen Projekten.

Wird das Außenwandelement in seine Einzelteile zerlegt, können die Materialgruppen jeweils Recycling-Szenarien zugeordnet werden. Im Rahmen dieser Studie werden nur die Recycling-Möglichkeiten für den Werkstoff Holz näher untersucht. Wie in Kapitel 2.12.1.3 erwähnt, wird für die Ökobilanz derzeit das Szenario Verbrennung zur Energiegewinnung („Verbrennung Holz in MVA“) angesetzt. Nach den oben beschriebenen Beurteilungskriterien ist die energetische Verwertung einer Wieder- oder Weiterverwendung der Baustoffe untergeordnet. Für letztere steht in der Ökobaudat 2011 keine Berechnung des End-of-Life Szenarios zur Verfügung. Seit der Ökobaudat 2015 gibt es allerdings ein alternatives Szenario „stoffliche Verwertung“ für einige Holzarten. Dass das Alternativ-Szenario nach DGNB als höherwertige Verwertung einzustufen ist, spiegelt sich nicht in den Ergebnissen des Ökobaudat-Datensatzes wieder. Wie in Abbildung 2-65 zu sehen, sind die Gutschriften für nicht erneuerbare Primärenergie und für alle Umweltwirkungskategorien außer dem Überdüngungspotenzial für das Szenario Verbrennung von Konstruktionsvollholz um ein Vielfaches höher als die Gutschriften für die stoffliche Verwertung.

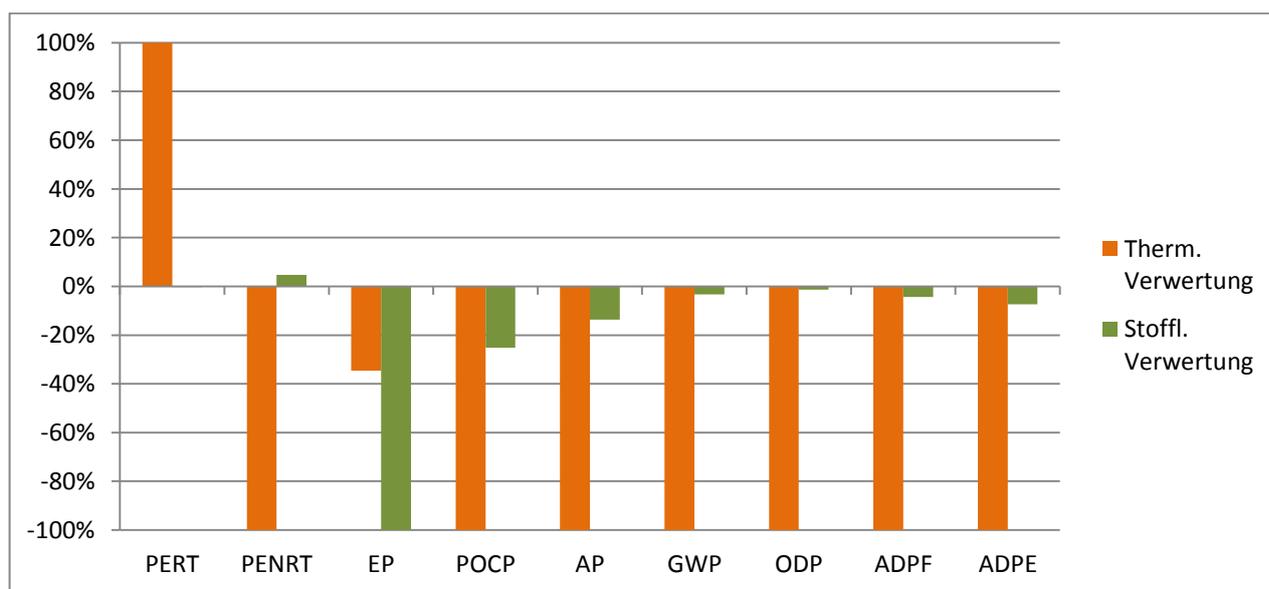


Abbildung 2-65: Vergleich Datensätze der End-of-Life Szenarien thermische und stoffliche Verwertung von Konstruktionsvollholz in Prozent (Eigene Darstellung nach (BMUB, o.J.)); PERT Total erneuerbare Primärenergie; PENRT Total nicht erneuerbare Primärenergie; EP Eutrophierungspotenzial; POCP Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; AP Versauerungspotenzial von Boden und Wasser ; GWP Globales Erwärmungspotenzial; ODP Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht ; ADPF Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für fossile Brennstoffe; ADPE Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente

Einen Anhaltspunkt für die mögliche Verwendung von Holz aus dem Abbruch von Gebäuden bietet die Altholzverordnung, in der Altholz und Baustellensortimente klassifiziert und Verwertungsverfahren zugeordnet werden. (Tabelle 2-36) Hierbei sind Hölzer der Kategorie AI und AII für eine Aufbereitung zu Holzhackschnitzeln und Holzspänen für die Herstellung von Holzwerkstoffen ohne weitere Auflagen zugelassen. Im Rückschluss auf den Neubau bedeutet dies für die Planung von Gebäuden: Holz sollte möglichst als Baustellensortiment von anderen Baustoffen trennbar sein. Verunreinigungen mit holzfremden Stoffen,

insbesondere Lacke und Beschichtungen, sind nach Möglichkeit zu vermeiden, da sie eine Verwertung einschränken.

Tabelle 2-39: Altholz aus dem Baubereich nach Altholzverordnung (AltholzV, 2002, Anhang III)

Altholzkategorie	Definition	
A I	naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde	
A II	verleimtes, gestrichenes, beschichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel	
A III	Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung ohne Holzschutzmittel	
A IV	mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz, wie Bahnschwellen, Leitungsmasten, Hopfenstangen, Rebpfähle, sowie sonstiges Altholz, das aufgrund seiner Schadstoffbelastung nicht den Altholzkategorien A I, A II oder A III zugeordnet werden kann, ausgenommen PCB-Altholz	
Baustellensortimente	naturbelassenes Vollholz	A I
	Holzwerkstoffe, Schalhölzer, behandeltes Vollholz (ohne schädliche Verunreinigungen)	A II
Altholz aus dem Abbruch und Rückbau	Dielen, Fehlböden, Bretterschaltungen aus dem Innenausbau (ohne schädliche Verunreinigungen)	A II
	Türblätter und Zargen von Innentüren (ohne schädliche Verunreinigungen)	A II
	Profilblätter für die Raumausstattung, Deckenpaneele, Zierbalken usw. (ohne schädliche Verunreinigungen)	A II
	Dämm- und Schallschutzplatten, die mit Mitteln behandelt wurden, die polychlorierte Biphenyle enthalten	Beseitigung
	Bauspanplatten	A II
	Konstruktionshölzer für tragende Teile	A IV
	Holzfachwerk und Dachsparren	A IV
	Fenster, Fensterstöcke, Außentüren	A IV
Imprägnierte Bauhölzer aus dem Außenbereich	A IV	

Holz als nachwachsender Rohstoff eignet sich sehr gut für eine langfristige Kaskadennutzung. Es bindet bei seiner „Herstellung“ CO₂, das möglichst lange gebunden bleiben sollte, indem das Holz aus dem Rückbau von Gebäuden einer weiteren Verwendung z.B. als Grundstoff für Holzwerkstoffe zugeführt wird. Am Ende der Kaskade kann Holz energetisch verwertet werden.

Hybride Bauweisen ermöglichen eine Nutzung von Holz auch an Gebäuden, für die es derzeit zum Beispiel aus Brandschutzgründen nicht als Baustoff für das Tragwerk in Frage kommt. Holz besitzt entscheidende Vorteile in der End-of-Life Phase, da es vollständig im ökologischen Kreislauf geführt werden kann. Durch die Entwicklung von Rückbau- und Wiederverwendungskonzepten kann das in Gebäuden verbaute Holz möglichst lange nutzbar gemacht werden und schließlich zur Energiegewinnung bereitstehen.

2.12.3 LZA - Ökobilanz der Fassadensysteme

Zur Beurteilung der ökologischen Qualität der Außenwandaufbauten wurden für die Außenwände der Beispielprojekte Ökobilanzen durchgeführt. Dies erfolgte auf der Grundlage der Ökobaudat 2011 mit Hilfe des vom BBSR entwickelten Tools eLCA (BBSR, o.J.). Die Werte wurden jeweils für 1 m² Fassadenfläche ermittelt und beinhalten alle Bauteilschichten und ggf. statisch erforderliche Befestigungsmittel.

2.12.3.1 Systemgrenze und Randbedingungen

In Anhang 1, Tabelle A3 können die jeweils verwendeten Datensätze und End-of-Life (EoL)-Szenarien abgelesen werden. Die EoL-Szenarien sind durch das BBSR im eLCA-Tool unveränderbar definiert, um die Vergleichbarkeit der Berechnungen zu gewährleisten. Grundsätzlich werden brennbare Rohstoffe einem Verbrennungs-Szenario zugeführt, während recycelbaren, aber nicht brennbaren Rohstoffen entsprechende Recycling- bzw. Aufbereitungs-Szenarien zugeordnet werden. Für weder brennbare noch wiederverwertbare Stoffe wird Deponierung gewählt (s. auch Kapitel 2.12.1.3).

Die Phase „Herstellung“ besteht aus Rohstoffgewinnung, Transport der Rohstoffe und Herstellung der Baustoffe, d.h. es handelt sich um die Lebenszyklusphasen „Cradle to Gate“ (von der Wiege bis zum Fabrikator). Die Phase Instandhaltung beinhaltet den Austausch (Entsorgung und Neuerstellung) von Bauteilschichten aufgrund des Endes ihrer technischen Lebensdauer. In der Lebenszyklus-Phase „Entsorgung“ ist die Aufbereitung oder Entsorgung der Baustoffe enthalten, inklusive möglicher Gutschriften, beispielsweise für die Strom- und Wärmeerzeugung aus Müllverbrennungsanlagen.

Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre, so dass die Ergebniswerte für Gebäude-Ökobilanz-Berechnungen im Zuge einer BNB- oder DGNB-Zertifizierung verwendet werden können. Lebensdauern der Baustoffe wurden der Schichtenabfolge angepasst, d.h. unter Umständen wird eine Schicht vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauer ausgetauscht, da eine darunterliegende Schicht das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat.

Alle dargestellten Bauteilaufbauten werden online im Werkzeug eLCA (bauteileditor.de) als Vorlagen zur Verfügung gestellt.

2.12.3.2 Holz und Holzwerkstoffe

Zusätzlich sind die Gewichts-Anteile für Holz und Holzwerkstoffe pro Bauteil angegeben. Diesen Rohstoffen wird in der Herstellungsphase die erneuerbare Primärenergie, die für das Wachstum benötigt wird, zugerechnet, so dass Holz sehr hohe Werte aufweist, obwohl keine industrielle Energieumwandlung erfolgt (s. auch Tabelle 2-30). Um dies sichtbar zu machen, ist der Anteil der erneuerbaren Primärenergie ausgewiesen, der dem Heizwert des Rohstoffes entspricht. Für Holzwerkstoffe wurden folgende Holzanteile verwendet:

- MDF 80% (Rüter, 2012)
- OSB 88% (Rüter, 2012)
- Holzfaserdämmung 80% (IBU, 2009)

Obwohl Zellulose ebenfalls zu den nachwachsenden Rohstoffen zählt, wurde es in der oben beschriebenen Rechnung nicht berücksichtigt: Zellulose-Einblasdämmstoff besteht laut den der Ökobaudat zugrun-

deliegenden Ökobilanz-Berechnungen zu großen Teilen aus Altpapier, d.h. die durch die Pflanzen aufgenommene Sonnenenergie wird der Papierherstellung zugewiesen und ist nicht Teil der Dämmstoffherstellung.

2.12.4 Systemimmanente Vorteile der Holzfassadenelemente

Zusätzlich zu den in der Ökobilanz untersuchten Kriterien und der guten Demontierbarkeit spricht eine Reihe von „weichen Faktoren“ für die Verwendung von Holzfassadenelementen an Stahlbetonbauten. Der Gestaltung von hinterlüfteten Außenbekleidungen der Fassadenelemente sind konstruktiv zunächst keine Grenzen gesetzt, eine Vielzahl von Materialien stehen zur Auswahl. Dadurch eröffnet sich großer Gestaltungsspielraum für das Erscheinungsbild der Gebäudehülle. Da die Elemente außerdem nichttragend sind, können Öffnungen relativ frei platziert werden.

Die Elemente müssen vor der Produktion genau geplant werden, so dass die Planungszeit im Vergleich zu Standardsystemen (z.B. Außenwände in Massivbauweise, Pfosten-Riegel-Fassade) länger sein kann. Der im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie erstellte Konstruktionskatalog leistet einen Beitrag zur Vereinfachung des Planungsprozesses. Die Fertigung der Elemente erfolgt, im Unterschied zur Massivbauweise, unter kontrollierten Bedingungen in der Fertigungshalle, so dass die Gebäudehülle erst bei der Montage der Witterung ausgesetzt wird. Dadurch sind eine höhere Präzision in der Herstellung der Gebäudehülle und ein Schutz der feuchteempfindlichen Schichten vor der Witterung gewährleistet.

Die Montagezeit schließlich ist wesentlich verkürzt im Vergleich zur Erstellung von Außenwänden vor Ort, so dass sich die hybride Bauweise besonders eignet, wenn der Bau unter erschwerten räumlichen oder zeitlichen Bedingungen stattfindet.

Die Verwendung von Holzfassadenelementen an Stahlbetontragkonstruktionen bietet, wie in den vorhergehenden Kapiteln erläutert, die Möglichkeit für einen erweiterten Einsatz des heimischen, nachwachsenden Rohstoffes Holz. Vor dem Hintergrund zunehmend auftretender Rohstoffknappheit und der Abhängigkeit vom Rohstoffimport (z.B. Stahl) eröffnen sich hier große Chancen für eine langfristig valide Bauweise. Darüber hinaus ist Holz der einzige im Bauwesen verwendete Rohstoff, der CO_2 einspeichert, ca. $0,9 \text{ t CO}_2$ pro m^3 (Wegener, 2010). In den Beispielprojekten für diese Studie wurden bis zu $0,7 \text{ m}^3$ Holz für einen m^2 Außenwand eingesetzt. Um die gesamten jährlichen CO_2 -Emissionen eines Bundesbürgers (ca. 11 t) einzuspeichern, müssten ca. $12,2 \text{ m}^3$ Holz verbaut werden, also ca. 175 m^2 Holzelementfassade.

3 Fertigungs- und montagetechnische Anforderungen

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Fertigungs-, Transport- und Montagethoden bei der Holz- und Betonbauweise vorrangig eingesetzt werden.

3.1 Holz

3.1.1 Grundlage

In Bezug auf Transport und Montage von Holzbauteilen stellt das Eigengewicht einen eher vernachlässigbaren Faktor dar. Maßgebende Faktoren für die Dimensionierung von Holzfassadenelementen sind fertigungs-, transport- und montagetechnische Möglichkeiten.

Gleichzeitig sind vor allem bei der Verwendung vorgefertigter Bausysteme definierte Maßordnungen bzw. Begrenzung von Maßabweichungen unerlässlich. Insgesamt ist es somit das Ziel transportable Bauelemente unter Beachtung von Modulmaßen herzustellen.

3.1.2 Vorfertigung

Vorgefertigte Bauelemente ermöglichen eine witterungsunabhängige Fertigung in einer zweckmäßig eingerichteten Werkstatthalle mit genau aufeinander abgestimmten Arbeitsschritten. Optimale Arbeitsbedingungen reduzieren das Risiko bauphysikalischer Schäden aufgrund eingehaltener, grundsätzlicher baulicher Maßnahmen gemäß Kapitel 2.10.5 und sichern Fertigstellungsfristen. (holzbau handbuch R01 T01 F07, 2009, S. 15) Größen der über die einzelnen Arbeitsschritte hinweg produzierten Elemente hängen dabei weniger von technischen Möglichkeiten als viel mehr von handelsüblichen Bauteilmaßen sowie Erfahrungswerten ab. Neben statischen Anforderungen gemäß Kapitel 2.2.4.5 dominieren Abmessungen der plattenförmigen Bekleidungen die Größe der Holzelemente und das Rastermaß des Holzrahmenbautragwerks. (Kolb, 2007)

Handelsübliche Plattenformate weisen heutzutage eine Breite von 1,25 bzw. 2,50 m auf und erstrecken sich im Einsatz als Holzrahmenbaubekleidung üblicherweise über mindestens zwei Balkenfelder. Mit einem kompatiblen Rastermaß der Holzrahmenständer eines Vielfachen von 0,625 m, der Hälfte bzw. ein Drittel der handelsüblichen Bekleidungsbreite, wird im Allgemeinen geplant und gebaut. (holzbau handbuch R01 T01 F07, 2009, S. 12) Dabei sind mit Rücksicht auf Fenster- und Türöffnungen Zusatzständer zur seitlichen Begrenzung miteinzuplanen. Übliche Lieferlängen von KVH- oder BSH-Elementen liegen zwischen 12 und 20 m. Dies bedeutet, dass Elemente gemäß dieser üblichen Abmessungen und Längen ohne Stoß innerhalb von Schwelle bzw. Rähm des Kernelements gefertigt werden könnten.

Längen der Plattenformate hängen von Plattenart und Hersteller ab und schränken die zu erreichende Geschosshöhe ein. Plattenformate von Baufurniersperrholz-, OSB-, Span- und MDF-Platten sowie von Gipsfaser- und Gipskartonfeuerschutzplatten unterschiedlicher Hersteller lassen erkennen, dass mit den meisten Plattenformaten anzustrebende Fassadenelemente mit einer Höhe von 3,00 m hergestellt werden können. Bei größeren Dimensionen können bei verschiedenen Herstellern Sonderformate in Auftrag gegeben werden.

Neben den fertigungstechnischen Möglichkeiten grenzen Anforderungen im Bereich des Transports und der Montage die möglichen Größenabmessungen der Wandelemente ein. Während der hohe Vorfertigungsgrad einen schnelleren Montageablauf ermöglicht und die Gefahr einer Bauteildurchfeuchtung auf

der Baustelle minimiert, ruft er gleichzeitig einen größeren Planungsaufwand im Bereich des Transports und der Montage hervor. Transportmittel, Hebezeuge, Anschlagmittel und Gerüststellungen sind von Seiten der Bauplanung aufeinander abzustimmen. (Mette, 2014)

3.1.3 Transport

Nach Produktion sowie Lagerung der vorgefertigten Holzfassadenelemente unter jeweils witterungsunabhängigen Bedingungen müssen die Holzbauteile transportsicher unter Aufrechterhaltung des Witterungsschutzes an die Baustelle gebracht werden. Die limitierenden Faktoren an die Dimensionen vorgefertigter Holzfassadenelemente stellen letztendlich die Transportmöglichkeiten bzw. Vorschriften im deutschen Straßenverkehr dar.

Nutzbare Grenzwerte während des Transports variieren je nach eingesetztem Fahrzeug. Maximal zulässige Abmessungen werden von der deutschen Straßenverkehrsordnung vorgeschrieben und hängen von Unterfahrhöhen der Brücken, Tunnel und Unterführungen sowie von allgemeinen Straßendimensionen ab. Je nach Überhöhung werden Spezialtransporte bzw. je nach Abmessungen und Bundesland sind polizeiliche Begleitungen erforderlich. Hier stellt sich die Frage, ob sich der Mehrkostenaufwand für den aufwendigeren Transport lohnt. (holzbau handbuch R01 T01 F07, 2009, S. 37) Straßenverkehrs-Ordnungen und Richtlinien regeln die möglichen Abmessungen sowie Achslasten bzw. das Gesamtgewicht der Transporte. Grenzwerte an die Lasten wie beim Transport von Betonfertigbauteilen spielen für den Transport leichter Holzbausysteme eine untergeordnete Rolle. Daher stehen im Holzbau Großraumtransporte im Gegensatz zu Schwertransporten im Vordergrund (vgl. Kapitel 3.2).

Inwiefern ein Transport als genehmigungspflichtiger Großraumtransport eingestuft wird, regeln die Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) sowie die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). Unterschieden wird zwischen Fahrzeug mit und ohne Ladung. Auskunft über maximal zulässige Abmessungen von Fahrzeug und Ladung (ladungsbedingte Grenzwerte) werden der StVO und über maximal zulässige Abmessungen von Fahrzeugen (fahrzeugbedingte Grenzwerte) der StVZO entnommen. Werden die Grenzwerte der StVO und der StVZO eingehalten, wird der Transport als genehmigungsfreier Transport eingestuft.

Allgemein dürfen gemäß StVO § 22 *„Fahrzeug und Ladung (...) zusammen nicht breiter als 2,55 m und nicht höher als 4 m sein (...)*“ (StVO, 2015, § 22 (2), Zeile 1) und *„(...) darf nicht länger als 20,75 m sein.“* (StVO, 2015, § 22 (4), Zeile 3) Zulässige Grenzwerte für Überstände der Ladung werden aufgeführt und in nachfolgender Abbildung grafisch zusammengefasst.

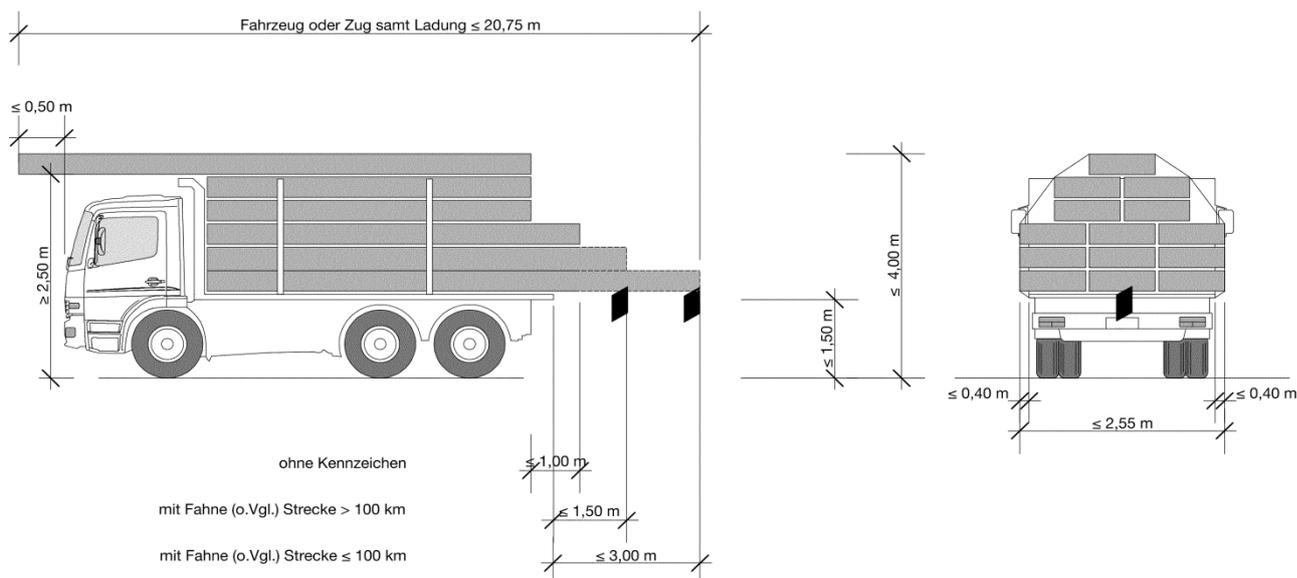


Abbildung 3-1: Maximal zulässige Abmessungen von Fahrzeug und Ladung gemäß StVO § 22 (Mette, 2014)

Fahrzeugbedingte Grenzwerte bezüglich Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen werden in StVZO § 32 aufgeführt. Die Basisgrenzwerte für Breite und Höhe entsprechen mit einer Breite von 2,55 m und einer Höhe von 4,00 m den Grenzwerten für Fahrzeug mit Ladung. Gemäß StVZO wird die Fahrzeugbreite „(...) bei geschlossenen Türen und Fenstern und bei Geradeausstellung der Räder“ (StVZO, 2015, § 32 (1), Zeile 31) gemessen ohne „Spiegel und andere Systeme für indirekte Sicht“ (StVZO, 2015, § 32 (1), Zeile 26) zu berücksichtigen. Jedoch werden für das Einzelfahrzeug und je nach Fahrzeugkombination Grenzwerte für Fahrzeuglängen angegeben. Abbildung 3-2 stellt grafisch die in der StVZO angegebenen Grenzlänge eines Einzelfahrzeugs dar. Abbildung 3-3 fasst die in der StVZO beschriebenen maximalen Grenzlängen für die Fälle Lastzug (Zugmaschine bzw. Lastkraftwagen mit Anhänger) und Sattelkraftfahrzeug zusammen.

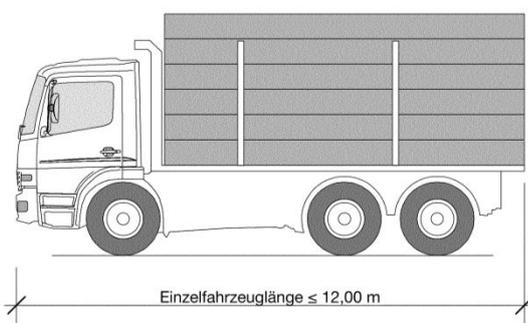


Abbildung 3-2: Maximal zulässige Einzelfahrzeuflänge gemäß StVZO § 32

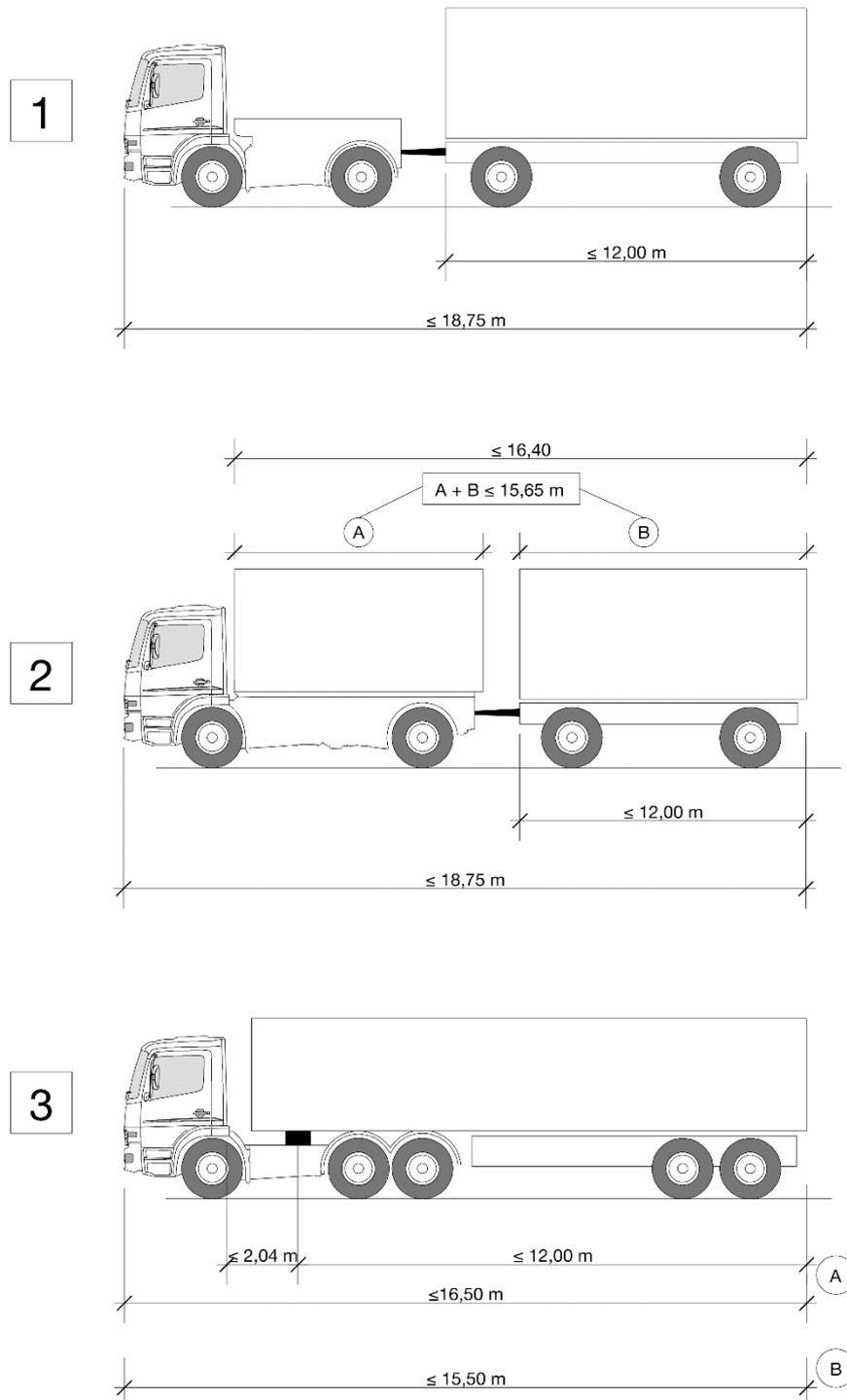


Abbildung 3-3: Maximal zulässige Fahrzeugkombinationslängen gemäß StVZO § 32,
 1: Lastzug (Zugmaschine mit Anhänger) gemäß StVZO §32 Abs. 4.3., 2: Lastzug (Lastkraftwagen mit Anhänger) gemäß StVZO §32 Abs. 4.4., 3: Sattelzug (Sattelzugmaschine mit Sattelanhänger) unterteilt in Fall „A“ und „B“ gemäß StVZO §32 Abs. 4.1.+ 2.

Hierbei erscheint der Fall des Einzelfahrzeugs für den möglichst effizienten Transport vorgefertigter Fassadenelemente eher nebensächlich. Als Zusammenfassung der ladungsbedingten sowie der fahrzeugbedingten Grenzwerte lässt sich je nach Fahrzeugkombination sagen, dass eine Mindestlänge von 12,00 m effektiv genutzt werden kann, unabhängig davon ob als Fahrzeug ein Sattelzug oder ein Lastzug zum Einsatz kommt. Diese Mindestlänge lässt sich durch Hinzuziehen der maximalen zulässigen Überstände, welche kenntlich zu machen sind (vgl. Abbildung 3-1), vergrößern. Im Falle einer Fahrstrecke bis 100 km könnte bei Sattelzügen die Gesamtlänge, einschließlich dem hinteren Überstand von 3 m, auf 19,50 m vergrößert werden. Bei einem Lastzug der die gemäß StVZO maximale Länge von 18,75 m ausschöpft, ist der hintere Überstand der Ladung auf 2 m beschränkt, da ansonsten die gemäß StVO maximal zulässige Länge für Fahrzeug und Ladung von 20,75 m überschritten werden würde. Demnach sind effektive Längen von 14 oder 15 m möglich.

Die aufgezeigten Grenzabmessungen stellen einen genehmigungsfreien Transport sicher. Weichen Transporte von den nach StVO oder StVZO zugelassenen Grenzen ab, werden sie als Großraum- oder Schwervertransporte bezeichnet. Hierbei können die Fälle Überschreitung der ladungsbedingten und / oder der fahrzeugbedingten Grenzwerte auftreten. (Komzet, 2011)

Im ersten Fall überschreitet ein Fahrzeug die fahrzeugbedingten Grenzwerte gemäß StVZO § 32 und 34. Damit tritt der Fall einer übermäßigen Straßennutzung ein. In diesem ersten Fall ist eine (Fahrer-) Erlaubnis nach StVO § 29 (3) sowie eine Ausnahmegenehmigung für das Fahrzeug nach StVZO § 70 erforderlich, welche im Allgemeinen von der Bezirksregierung genehmigt wird (Bsp. für München: Regierung von Oberbayern in München). Diese beiden Dokumente sind miteinander gekoppelt und erteilen fahrzeuggebunden die Erlaubnis der Straßennutzung. Auflagen, wann und wo gefahren werden darf, sind hierbei möglich (Informationsquelle: Kreisverwaltungsreferat München).

Im zweiten Fall überschreitet ein Transport die ladungsbedingten Grenzwerte für Breite, Höhe oder Länge nach StVO § 22. Eine Ausnahmegenehmigung für die Ladung im Einzelfall ist nach StVO § 46 (1) Abs. 5 erforderlich, welche von der zuständigen obersten Landesbehörde oder einer nach Landesrecht bestimmten Stelle genehmigt wird (Bsp. für München: Kreisverwaltungsreferat München). Dort wird geprüft, ob für die beantragte Fahrtroute mit den angegebenen Transportabmessungen zusätzliche Maßnahmen anzuordnen sind. Je nach Abmessungen der Fahrzeugkombination sind für den individuellen, genehmigungsbedürftigen Transport Auflagen in Form von Begleitfahrzeugen und / oder Bauwerkabsicherungen erforderlich. (Informationsquelle: Kreisverwaltungsreferat München).

Der dritte Fall stellt eine Kombination aus einer Überschreitung der fahrzeug- sowie ladungsbedingten Grenzwerte und damit eine Kombination aus den sich daraus ergebenden Maßnahmen dar.

Eine nähere Erläuterung des zweiten Falles ist für den Transport von Holzrahmenbauelementen von Interesse. Mithilfe einer Ausnahmegenehmigung für die Ladung im Einzelfall ist eine Zulassung für die Benutzung der entsprechenden Straßen erforderlich. Ein Antragsformular ist je nach Firmensitz bzw. Startpunkt des Transportweges bei der entsprechenden Verwaltungsbehörde (Bsp. für München: Kreisverwaltungsreferat München – Hauptabteilung Straßenverkehr) einzureichen. Je nach Fahrtroute innerhalb Deutschlands muss mit einer Bearbeitungszeit des Antrags von 14 Tagen gerechnet werden (bei Fahrtwegen mit Brückenbauwerken auch länger). Es wird geprüft, ob die beantragte Fahrtroute mit den angegebenen Transportabmessungen befahrbar ist und ob das Hinzuziehen anderer (Bundes-) Länder erforderlich ist. Je nach Fahrtroute werden Auflagen zur Transportsicherung oder zum Schutz von Verkehrsteilnehmern und Brückenbauwerken erteilt.

Eine Überschreitung der zulässigen Transportbreite bzw. Transportlänge führt aufgrund feststehender Fahrbahnbreiten und Abbiegelängen zu größeren Komplikationen und damit zu einem erheblichen Mehrkostenaufwand. Wird die Möglichkeit einer erforderlichen Ausnahmegenehmigung für die Ladung im Einzelfall mit einbezogen, können Grenzwerte zur Orientierung angegeben werden. Unter Berücksichtigung einer Fahrspurbreite von 3,50 m sowie erlaubten Abbiegelängen kann mit einer Breite von 3 m (statt 2,55 m) sowie einem Längenüberhang von 4 m (statt 3 m) geplant werden. Eine Überschreitung dieser Grenzwerte erfordert neben der Ausnahmegenehmigung das Mitführen eines Begleitfahrzeugs oder unter Umständen auch eine polizeiliche Begleitung zur Absicherung des Verkehrs.

Eine Überschreitung der zulässigen Transporthöhe hängt von den zu passierenden lichten Durchfahrtshöhen von Überführungen, Tunneln, Ampeln, Oberleitungen, Brücken etc. ab. Gemäß Verkehrsblatt für die Kennzeichnung von Ingenieurbauwerken mit beschränkter Durchfahrtshöhe über Straßen aus dem Jahr 2000 sollen *"Ingenieurbauwerke über Straßen ... eine lichte Höhe von mindestens 4,50 m besitzen. Die lichte Höhe ergibt sich aus der zulässigen Fahrzeughöhe einschließlich einer Ladung von 4 m (StVZO § 32 Abs. 2 und StVO § 22 Abs. 2) plus einem Sicherheitsabstand von mindestens 0,50 m."* (Verkehrsblatt, Ziffer 1.1, 2000) Mit einem mindestens geforderten Sicherheitsabstand von 0,20 m, bedeutet dies, dass eine zulässige Transporthöhe von etwa 4,30 m möglich ist. Ausgenommen sind Durchfahrtshöhen von Ingenieurbauten, u.a. von älteren Bauwerken, mit einer lichten Höhe von weniger als 4,50 m, welche gemäß Ziffer 1.2 obigen Verkehrsblatts durch Zeichen und Leitmale gekennzeichnet sind.

Die gesamte Transporthöhe setzt sich aus Fahrzeug und Ladung zusammen. Um die zulässige Transporthöhe einschließlich Überhöhung von 0,30 m einzuhalten, sollten Ladefläche der Fahrzeugkombination und Bauteilhöhe zusammen eine Transporthöhe von 4,30 m nicht überschreiten. Für Großraum- und Schwerversporte werden vorwiegend Spezialtieflader verwendet, welche demnach bei einer Ladeflächenhöhe von 0,30 m Bauteile bis 3,70 m Höhe ohne weitere Maßnahmen und bis maximal 4,00 m Höhe mit Ausnahmegenehmigung im Einzelfall transportieren könnten.

Fahrtrouten sind diesbezüglich zu überprüfen und zu planen. Dem Antragssteller müssen Fahrzeugangaben sowie die genaue Fahrtroute bekannt sein. Fahrzeugbedingte Grenzwerte gemäß StVZO definieren maximal zulässige Abmessungen des Fahrzeugs und erfordern bei Abweichung eine (Fahrer-)Erlaubnis sowie eine fahrzeuggebundene Ausnahmegenehmigung. Ladungsbedingte Grenzwerte gemäß StVO definieren maximal zulässige Abmessungen des Fahrzeugs mit Ladung. Für die Ladung (ohne Fahrzeug!) bzw. das Bauteil kann im gängigen Fall eines Spezialtiefladers als Sattelzug festgehalten werden: Breite von 2,55 m, Höhe von 3,70 m sowie Länge von bis zu 15 m inkl. Längenüberhang von 3 m. Unter Berücksichtigung einer erforderlichen Ausnahmegenehmigung für die Ladung im Einzelfall können Überhöhungen als Obergrenze im gängigen Fall eines Spezialtiefladers als Sattelzug festgehalten werden: Breite von 3,00 m, Höhe von 4,00 m sowie Länge von bis zu 16 m inkl. Längenüberhang von 4,00 m. Weitere Überhöhungen sind mit aufwendigen Transportfahrten verbunden und erfordern Ausnahmegenehmigungen für die Ladung im Einzelfall mit Auflagen in Form von Begleitfahrzeugen und / oder Bauwerkabsicherungen.

3.1.4 Montageablauf und -methoden

Die Ausrichtung der großflächigen Holzfassadenelemente kann vertikal oder horizontal erfolgen.

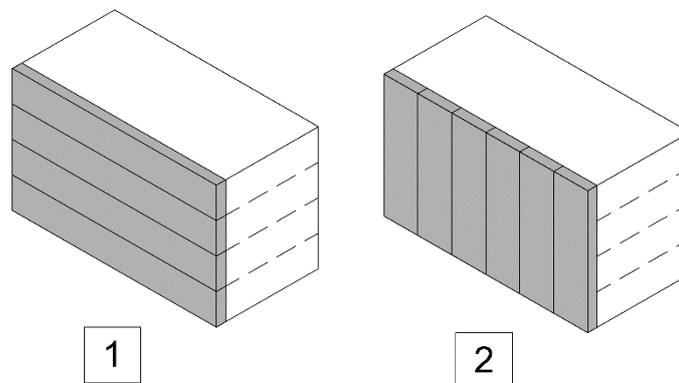


Abbildung 3-4: Ausrichtung der großflächigen Holzfassadenelemente in vertikaler und horizontaler Anordnung (Eigene Darstellung)

Die wichtigsten Organisationspunkte während der Montage sind geeignete, leistungsstarke Hebeemaschinen sowie ein möglichst abgestimmter Ablaufprozess zwischen Werkstatt bis hin zur Befestigung am Stahlbetontragwerk. Elementgewicht und Elementgröße sowie die maximal benötigte Hebeentfernung bestimmen die Wahl des Auto- bzw. Standkrans. Während des Hebevorgangs sollte ein erforderliches Drehen der Fassadenelemente in die richtige Einbauausrichtung vermieden werden. Gleichzeitig ist es von Vorteil, wenn die Fassadenelemente auch während des Transports in Richtung ihres Tragsystems belastet werden, abgesehen davon, dass die für den Transport vorgeschriebenen Abmessungsgrenzwerte eingehalten werden müssen. Insgesamt erscheint ein stehender Transport (Belastung in Tragrichtung) von horizontal ausgerichteten, vorgefertigten Elementen (Einhaltung der vorgeschriebenen Transportabmessungen), welche mit einer geeigneten Hebemaschine in der richtigen Ausrichtung direkt vom Tieflader an den vorgesehenen Ort gehoben werden (kein Drehen oder Kippen der Elemente) als geeignetste Variante.

Ein Drehen oder Kippen hätte eine kurzzeitige Belastung der Fassadenelemente zur Folge, welche nicht mit der geplanten Belastung der ständigen Bemessungssituation übereinstimmt. Die Fassadenelemente sind in diesem Fall in Abhängigkeit von Transportlage und Hebevorgang zusätzlich in der vorübergehenden Bemessungssituation (Bauzustand) zu bemessen.

Um eine zusätzliche Zwischenlagerung der Holzbauelemente vor Ort zu vermeiden, ist darauf zu achten, dass der Ladeplan der vorgefertigten Elemente mit der Montagefolge auf der Baustelle übereinstimmt. Dies bedingt eine Fertigung und eine Verladung der Wandelemente gemäß Montagereihenfolge auf der Baustelle. Neben Angaben bezüglich Gewicht und Lagerungsart der Elemente sollte eine Montageanweisung auch Informationen über die Anschlagpunkte des Kranes beinhalten.

Ferner soll erwähnt sein, dass eine vertikale Ausrichtung der Holzfassadenelemente je nach Größe der Elemente eine Lastansammlung über mehrere Felder hinweg mit sich bringt, sodass diese mit einer vorgestellten oder einer vorgehängten Fassadenanordnung umgesetzt werden muss. Für diese Varianten muss ein statischer Nachweis erstellt bzw. die notwendigen Verbindungsmittel bezogen auf eine Einheit (Länge, Elementfläche) angegeben werden. Eine horizontale Ausrichtung der Elemente bringt den Vorteil, unabhängig zwischen den einzelnen Anschlussvarianten wählen zu können. Die Stöße zwischen den Holzrahmen-

bauelementen sind dicht zu stoßen und luftdicht auszuführen, um alle statischen und bauphysikalischen Funktionen auch in der Elementfuge sicherzustellen.

Sowohl transportierbare als auch montierbare Holzbauelemente sollten zur Vermeidung von Mehrkosten und um einen reibungslos ablaufenden Prozess zu gewährleisten Abmessungen der Größe $h \times b = 3,70 \text{ m} \times 15,00 \text{ m}$ bzw. - unter Berücksichtigung von Ausnahmegenehmigungen für die Ladung im Einzelfall - $h \times b = 4,00 \text{ m} \times 16,00 \text{ m}$ einhalten.

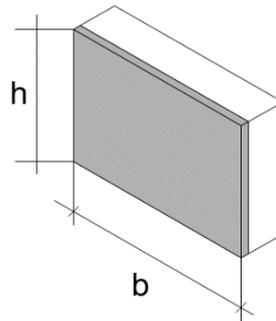


Abbildung 3-5: Ausrichtung und Abmessungen eines HRB-Fassadelements (Eigene Darstellung)

3.2 (Stahl-)Beton

3.2.1 Ortbetonbauweise mit schlaffer Bewehrung

Die unter Kapitel 2.2.2 vorgestellten Bauweisen können in verschiedensten Ausführungsformen realisiert werden.

3.2.1.1 Deckenschalungen

Das am meisten angewandte Bauverfahren ist die Ortbetonbauweise. Hierfür muss zunächst eine Schalung erstellt werden. Bei Decken wird diese als Träger- oder Paneel-Träger-Schalung ausgeführt. Bei großformatigen Decken kommen auch Deckentische zum Einsatz.



Abbildung 3-6: Übersicht der üblichen Systeme bei Deckenschalungen (Peri, o.J.), a) Trägerschalung, b) Paneel-Träger-Schalung, c) Deckentische

Trägerschalung: (Zimmerman, 2005, Kapitel 5)

Vorteile:

- Individuelle Formen möglich
- Statische Optimierung durch variable Träger- und Stützenabstände der Schalung
- Individuelle Betonoberfläche durch frei wählbare Schalungsplatte
- Schalungssystem auch bei Halbfertigteilbauweise anwendbar

Nachteile

- Erhöhter Arbeitsaufwand zur Montage
- Vorhaltemenge der Schalung ist hoch, da die komplette Schalung bis zum Ausschalen eingebaut bleiben muss. Beim Frühausschalen müssen zusätzliche Stützen gestellt werden.
- Eine durchgehend glatte Oberfläche verursacht zusätzliche Kosten, da die Stoßausbildung der Schalplatten erhöhte Anforderungen aufweist

Paneel-Träger-Schalung (Zimmerman, 2005, Kapitel 5):

Vorteile:

- Geringerer Schalungsaufwand als bei Trägerschalung da Standardisierte Schalungspaneele
- Relativ geringes Eigengewicht der Einzelteile. Schalungsarbeiten sind durch zwei Arbeiter möglich
- Fallkopfstützen ermöglichen ein Frühausschalen der Paneele. Lediglich die Stützen verbleiben eingebaut.
- Geringere Vorhaltemenge als bei Trägerschalung erforderlich

Nachteile

- Neuwert der Schalung höher als bei der Trägerschalung. Höhere Ansätze bei Abschreibung und Verzinsung bzw. Miete
- Paneele sind nach dem Ausschalen an der Unterseite deutlich zu erkennen. Ungenauigkeiten sind offensichtlich zu sehen.
- Details müssen konventionell gelöst werden

Deckentische (Zimmerman, 2005, Kapitel 5):

Vorteile:

- Hoher Vorfertigungsgrad mit großen Schalfflächen
- Je Kranhub sind große Umsetzeinheiten möglich
- Wenig Personal für das Umsetzen erforderlich
- Deckentische können auch über Brüstungen gehoben werden, sofern klappbare Stützen vorhanden sind
- Die Absturzsicherung kann vormontiert werden

Nachteile:

- Keine Anwendung bei Lochfassaden
- Details müssen konventionell gelöst werden
- Gegebenenfalls sind höhere Krankapazitäten erforderlich

3.2.1.2 Wandschalungen

Bei Wandschalungen werden im Wesentlichen zwei Schalungssysteme unterschieden, die Träger- und Rahmenschalung. Das System der Trägerschalung bei Wänden ist auch analog zu dem der Decken anwendbar. Die Rahmenschalung besteht aus standardisierten Schalungselementen, deren Abmessungen in festen Rastersprüngen angeboten werden. (Zimmerman, 2005, Kapitel 5)

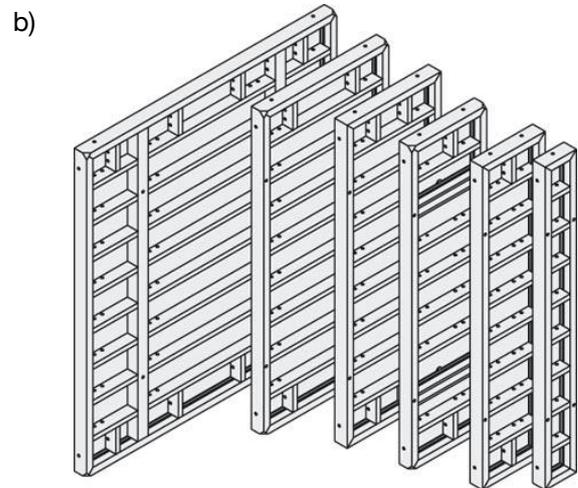
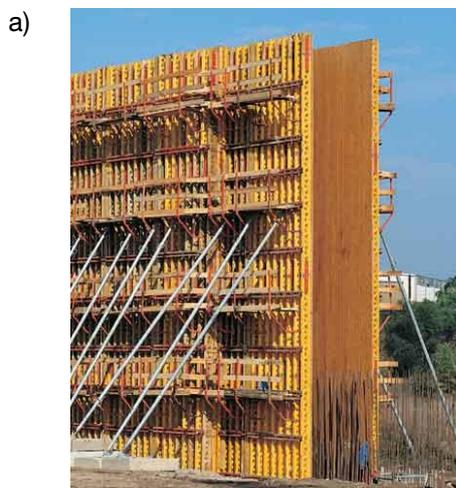


Abbildung 3-7: Übersicht der üblichen Systeme bei Wandschalungen (Peri, o.J.), a) Trägerschalung, b) Rahmenschalung

Trägerschalung (Zimmerman, 2005, Kapitel 5):

Vorteile:

- Individuelle Formen möglich
- Freie Anordnung der Schalungsanker
- Sichtbetonanforderung umsetzbar
- Vormontage möglich

Nachteile:

- Erhöhter Arbeitsaufwand zur Montage
- Kaufteile erforderlich: Schalhaut

Rahmenschalung (Zimmerman, 2005, Kapitel 5):

Vorteile:

- Viele standardisierte Element mit verschiedenen Abmessungen
- Einfache Verbindung untereinander mit Richtschloss
- Schalungssystem komplett als Mietschalung verfügbar
- Leichte Rahmenschalungen können auch von Hand versetzt werden

Nachteile:

- Lage der Schalungsanker vorgegeben
- Kranabhängigkeit

3.2.1.3 Stützenschalungen (Zimmerman, Kapitel 5, 2005)

Stützenschalungen bei Rechteckstützen werden sowohl als Trägerschalung als auch als Rahmenschalung ausgeführt. Die Vor- und Nachteile sind analog denen der Wandsysteme. Für Rundstützen gibt es spezielle Schalungssysteme. Die Durchmesser reichen, bei einem Raster von fünf Zentimeter, von 25 bis 70 Zentimeter. Alle Schalungssysteme für Stützen müssen freitragend ausgeführt werden, wodurch Schrägsprieße zur Abstützung notwendig sind. Unerlässlich sind am oberen Ende der Schalung Betoniergerüste, damit die Arbeitssicherheit gewährleistet werden kann.

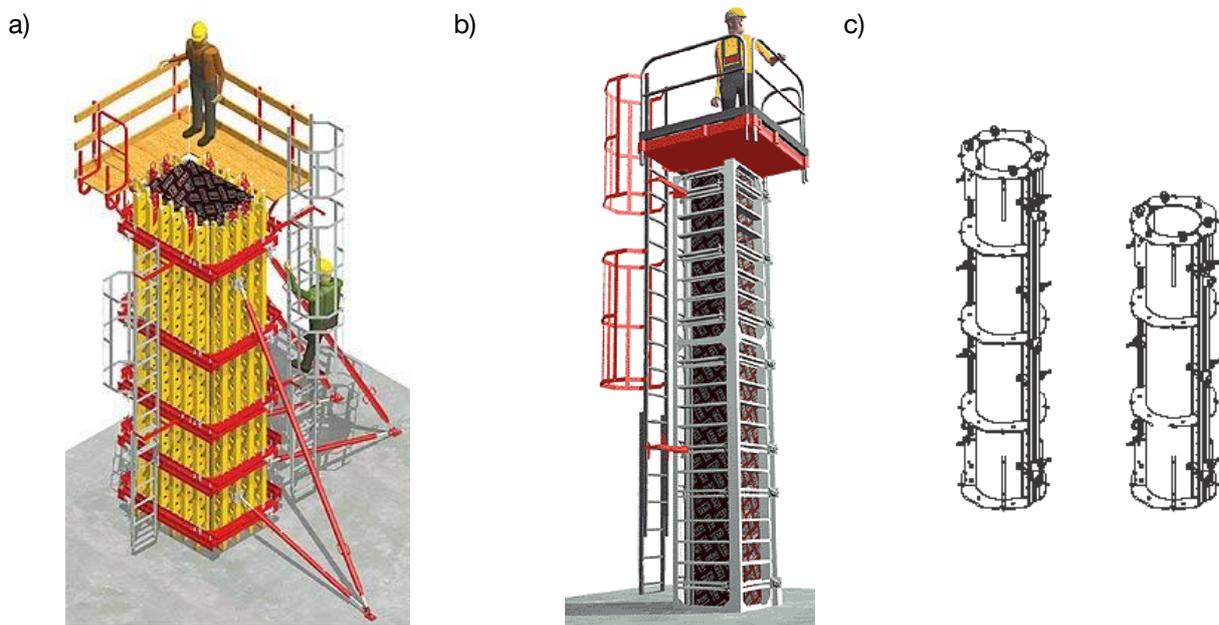


Abbildung 3-8: Schalungssysteme für Stützen (Peri, o.J.), a) Trägerschalung, b) Rahmenschalung, c) Schalung für Rundstützen

3.2.1.4 Herstellung

Bei Decken muss nach dem Einschalen die obere und untere Bewehrungslage noch verlegt werden, bevor betoniert wird. Bei Wänden wird zunächst eine Seite eingeschalt. Nachdem die Bewehrung verlegt wurde, wird auch die zweite Seite der Schalung montiert. Die Stützen werden zunächst bewehrt. Anschließend wird die Schalung gestellt.

3.2.2 Ortbetonflachdecken mit Vorspannung

Zur wirtschaftlichen Erhöhung der Feldweiten oder zur Reduzierung der Verformungen können Ortbetondecken vorgespannt werden. Der Planungs- und Herstellungsaufwand ist jedoch deutlich höher als bei konventionellen schlaff bewehrten Decken.



Abbildung 3-9: Flachdecke mit verbundloser Vorspannung (Suspa DSI, o.J.)

3.2.3 Halbfertigteile mit Ortbetonergänzung

Sowohl Wände als auch Decken können als Halbfertigteile mit Ortbetonergänzung hergestellt werden. Bei den Wänden werden Doppelschalen im Fertigteilwerk hergestellt, die bereits die erforderliche Wandbewehrung beinhalten. Eine Betonschale weist eine Stärke von ca. fünf bis sechs Zentimeter auf. Der lichte Abstand der Schalen untereinander wird so gewählt, dass in Addition mit den Schalendicken die Wandstärke im Endzustand erreicht wird. Die Gitterträger gewährleisten den Abstand der Betonschalen und verbessern den Verbund zwischen Fertigteil und Ortbetonergänzung. Bevor der Kernbeton eingebracht wird, muss noch eine Fugenbewehrung oder ein Fugenband eingebaut werden. Ob beides eingebaut wird hängt von der Philosophie des Elementherstellers ab, wobei der Montageablauf Herstellerabhängig ist.

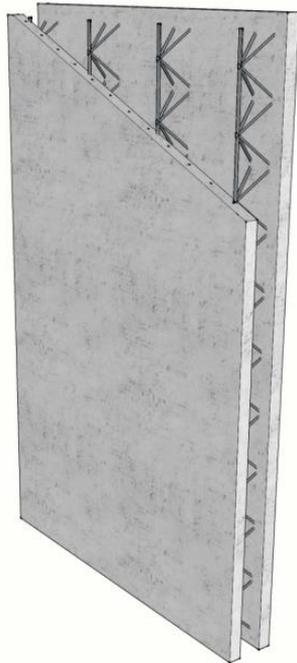


Abbildung 3-10: Doppelwand
(Eigene Darstellung)

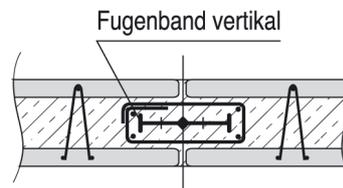


Abbildung 3-11: Fugenbewehrung mit Fugenband
(Wohnbeton, 2014)

Die Deckenelemente werden ebenfalls in einer Stärke von fünf bis sechs Zentimeter hergestellt. Die untere Bewehrungslage wird in Richtung der obligatorischen Gitterträger ab Werk eingebaut. Die Querbewehrung der unteren Lage wird üblicherweise nach dem Verlegen der Elemente aufgelegt. Zu erwähnen ist, dass ggf. durch das Auflegen der Querbewehrung auf die Platte die statische Nutzhöhe in Nebentragsrichtung reduziert wird und mehr Querbewehrung erforderlich wird.

Die Gitterträger erfüllen bei Elementdecken mehrer Aufgaben. Zum einen dienen sie als Anschlagpunkt bei Montage durch den Kran. Zum anderen wirken sie als Verbundbewehrung und Abstandshalter für die obere Bewehrungslage.

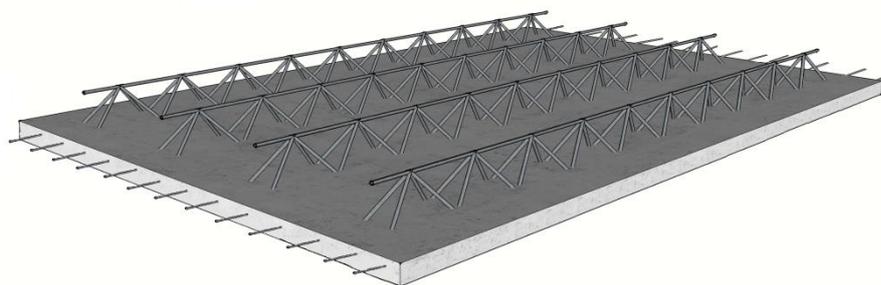


Abbildung 3-12: Elementdecke (Eigene Darstellung)

Halbfertigteile sind seit Jahren etabliert und im Endzustand als gleichwertig zu Ortbetonbauteilen zu sehen. Auch bei der Tragwerksplanung geht man zunächst von einem Ortbetonsystem aus, wobei in einem weiteren Bearbeitungsschritt spezifische statische Nachweise in Bezug auf die Halbfertigteilbauweise erforderlich sind. Der Baufortschritt kann erheblich beschleunigt werden, indem die Betonschalen als verlo-

rene Schalung wirken. Die Schalungsarbeiten können entfallen. Ein Deckensystem mit Durchlaufwirkung ist problemlos umsetzbar.

Erwähnt sei jedoch, dass oftmals die Erstplanung in reiner Ortbetonbauweise durchgeführt wird, wodurch zusätzliche Planungsleistungen erforderlich werden. Daher ist es von Vorteil, wenn die Umstellung auf Halbfertigteile möglichst frühzeitig geschieht. An die Anpassung der Anschlussbewehrungen, beispielsweise einer Ortbetonbodenplatte auf eine Halbfertigteilwand, wird besonders hingewiesen. Die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Elemente ist im Vergleich zu Ortbetonbauteilen gleichwertig, jedoch sind bei Halbfertigteilen immer Fugen vorhanden. Eine durchgehende Sichtbetonoptik ist somit nicht möglich.

3.2.4 Betonfertigteile (Vollfertigteile)

Schlaff bewehrte Betonfertigteile werden im konventionellen Hochbau eher selten eingesetzt. Diese werden üblicherweise im Industriebau oder im Ingenieurbau verwendet. Vorgespannte Fertigdecken sind im Hochbau durchaus verbreitet. Die Vordimensionierung kann anhand einer Typenstatik durch einen Tragwerksplaner erfolgen. Im Zuge der Ausführungsplanung ist man aber immer auf einige wenige spezialisierte Fertigteilwerke angewiesen, die Spannbetonfertigdecken anbieten. Charakteristisch von Vollfertigteilen ist, dass diese in der Regel als Einfeldträger realisiert werden.

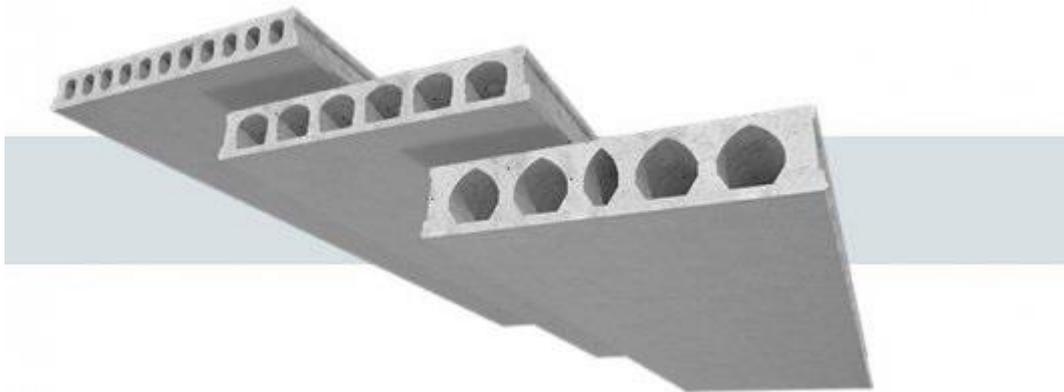


Abbildung 3-13: Spannbetonfertigteildecken (Ketonia, o.J.)

3.2.5 Vorfertigung

Durch das hohe Maß an Vorfertigung der Elemente kann gewährleistet werden, dass der Montagevorgang auf kurze Vorbereitungen reduziert werden kann und somit eine schnelle Montage umsetzbar ist. Je großformatiger ein Element ist, desto schneller kann eine Montage erfolgen. Der limitierende Faktor ist hierbei oft die Einrichtung des Fertigteilwerks bzw. die Kapazität der Transportmittel.

3.2.6 Transport und Logistik

Nach der Vorfertigung im Fertigteilwerk werden die Elemente auf die Baustelle geliefert. Hierbei können die Abmessungen der Elemente maßgebend werden. Besonderes Augenmerk ist bei einer reibungslosen Montage auf die Logistik zu legen. Es ist abzuklären, ob entsprechende Lagerflächen vorhanden sind oder ob die Elemente "just in time" auf die Baustelle geliefert und direkt montiert werden.

In Kapitel 3.1.3 wurden bereits die gängigsten Transportmittel aufgezeigt und die maximalen Abmessungen angegeben. Bei dem Transport von Betonfertigteilen hängt die Wahl des Transportmittels von mehreren Gesichtspunkten ab. Zur erwähnen sind vor allem:

- Abmessungen der Fertigteile
- Gewicht der Fertigteile
- Lieferort sowie die Straßenbedingungen (zul. Achslasten, Straßenbeschaffenheit)

Entwurfskriterien bei den Halb- und Vollfertigteilen sind neben den geometrischen Vorgaben des Entwurfsverfassers ebenso Vorgaben für den Transport zur Baustelle und für den Einbau auf der Baustelle durch den Kran. Bei dem Transport von Betonhalbfertigteilen unterscheidet man zunächst den Transport von Elementwänden und Elementdecken. Elementwände können auf drei verschiedene Arten zur Baustelle gebracht werden.

- Zum einen können die Elemente in der Transportbox geliefert werden. Die Box ist maximal neun Meter lang. Elemente von einer Höhe von maximal 2,90 m können transportiert werden. Die Ladung in der Box darf höchstens eine Gesamtmasse von 25 Tonnen aufweisen.
- Das zweite Transportmittel ist ein Anhänger mit Tiefbett. Hierbei können Elemente mit einer Höhe von 3,70 m transportiert werden. Die maximale Länge des Tiefbetts beträgt 9,50 m, wobei die Elemente höchstens eine Gesamtmasse von 22 Tonnen aufweisen dürfen. Der große Nachteil des Tiefbettanhängers ist seine geringe Bodenfreiheit. Daher können nur gut ausgebaute Straßen befahren werden.
- Die dritte Transportart von Elementwänden ist der liegende Transport. Hierbei ist zu beachten, dass die Stapelhöhe durch Tragfähigkeit der Gitterträger begrenzt ist. Darüber hinaus müssen die Elemente zum Entladen um 90° gedreht werden. Beim unsachgemäßen Aufrichten der Elemente können Abplatzungen an der Drehkante des Elements die Folge sein.

Der Transport der Halbfertigteile der Decken erfolgt meistens mit dem Sattelzug. Die maximalen Elementgrößen betragen ca. 11 m x 2,5 m. Die Elemente werden gestapelt transportiert. Die größte Stapelhöhe beträgt ca. 1,20 m, welche vom jeweiligen Gitterträger abhängt und durch die jeweilige allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des entsprechenden Herstellers geregelt ist.

Tabelle 3-1: Übersicht der Transportmittel mit Eigenschaften (Eigene Darstellung)

Transporttyp	Max. Gesamtgewicht gem. StVZO	Besonderheiten und Anmerkungen
Sattelzug	40 to*	Rückwärtsfahren einfacher
Lastzug: Lastkraftwagen mit Anhänger	36 to	Wendigkeit
Lastzug: Zugmaschine mit Anhänger	24 to	
Lastzug mit Tiefbettanhänger, Innenlader	24 to	Geringe Bodenfreiheit

*= abhängig von der Achszahl

3.2.7 Montageablauf und -methoden

Die Montage erfolgt in der Regel mit dem Baustellenkran. Dabei muss das Fertigteilwerk mit der Bauleitung abklären, welche Lasten bei entsprechender Ausladung durch den Kran umsetzbar sind. Gegebenenfalls ist zur Montage der Elemente ein Autokran mit höherer Traglast erforderlich. Bei einer Wichte des Betons von $\gamma_{\text{Beton}}=2,5 \text{ t/m}^3$ (DIN EN 1992-1-1, 2011) können die Massen der Betonfertigteile anhand ihres Volumens berechnet werden.

Das Gewicht der Holzelemente ist abhängig vom Aufbau und der Größe und im Einzelfall berechnet werden.

3.3 Schnittstelle

Die Schnittstelle zwischen dem Stahlbetontragwerk und den Fassadenelementen ist ein maßgebliches Entwurfskriterium. Fertigungstoleranzen und lastabhängige Verformungen müssen aufeinander abgestimmt werden, damit die Montage reibungslos und effizient ablaufen kann.

3.3.1 Fertigungstoleranzen

Speziell für vorgefertigte Holzbauteile sind Grenzabweichungen in DIN 18203-3 angegeben. Für die Winkelabweichungen in der Länge, Breite und Dicke von Holztafeln wird auf die Maßtoleranzen in DIN 18202 verwiesen.

Die ortsunabhängige Vorfertigung von Produkten in verschiedenen Fertigungsstätten erfordert eine Planung der noch zulässigen Toleranzen. Die Maße der Modulreihen können nicht ohne Berücksichtigung geplanter Ausgleichsmöglichkeiten von Ungenauigkeiten übernommen werden. Die Abmessungen der Elemente sind um ein bestimmtes Istmaß kleiner oder größer als ihr modulares Nennmaß. In der Fertigung ist das den Zeichnungen eingetragene Nennmaß bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nur mit einer bestimmten Genauigkeit erzielbar. Für die Herstellung wird ein Spielraum (Toleranz) für das Maß des zu fertigenden Werkstücks (Grenzabmaß) vorgegeben.

Die Maßtoleranzen können in folgende Toleranzarten eingeteilt werden:

- Maßtoleranzen der Fertigung
- Maßtoleranzen der Montage
- Maßtoleranzen der Absteckung oder Aufmaß am Bau
- Maßtoleranzen durch Formänderungen von Bauteilen

In DIN 18202 sind baustoffunabhängig Toleranzen festgelegt, die beim Einsatz in Bauwerken eingehalten werden müssen. Die Angabe von Toleranzen ist notwendig, um die Abweichungen von den Nennmaßen der Größe, Gestalt und der Lage von Bauteilen und Bauwerken zu begrenzen. Durch die Einhaltung der Toleranzen wird ein funktionsgerechtes Zusammenfügen von Bauelementen des Roh- und Ausbaus, ohne nachträgliche Anpassungsarbeiten ermöglicht. Die normativ angegebenen Toleranzen stellen die für Standardleistungen erreichbare Genauigkeit dar. Andere Genauigkeiten können zusätzlich festgelegt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Einhaltung hoher Genauigkeitsanforderungen zu einem erhöhten Herstellungsaufwand führt, der technisch begründbar sein muss. Anzumerken ist auch, dass „Werte für zeit- und lastabhängige Verformungen sowie auch aus Temperatur nicht Gegenstand“ der DIN 18202 (DIN 18202, 2013) sind.

In Bezug auf das Stahlbetontragwerk sind zum einen die Herstellungstoleranzen nach DIN EN 13670 (DIN EN 13670, 2011) und DIN EN 13369 (DIN EN 13369, 2013) zu nennen.

Tabelle 3-2: Rohbautoleranzen nach DIN EN 13670 (DIN EN 13670, 2011)

Vertikale Toleranzen zwischen Balken und Platten	Horizontale Toleranzen zwischen Stützen und Wände	Öffnungen
± 20 mm	± 20 mm ^a oder ± l/600 max.: 60 mm	± 25 mm

l - lichte Weite, ^a Für Stützen und Wände, die Fertigteile tragen, können je nach der Längentoleranz für das gestützte Bauteil und erforderlicher Auflagerlänge strengere Werte erforderlich sein

3.3.2 Lastabhängige Verformungen:

Die Verformungen der Deckenplatten sind unter der maßgebenden Belastung im gerissenen Zustand unter Berücksichtigung der Langzeiteffekte Kriechen und Schwinden des Betons zu untersuchen. Darüber hinaus können ebenfalls Temperatureinwirkungen bemessungsrelevant werden. Als weitere Eingangsparameter müssen die vertikalen sowie horizontalen Lasten der Fassade beispielsweise infolge Eigengewicht, Nutzlast und Wind bekannt sein. Gemäß Abschnitt 7.4 der DIN EN 1992-1-1 (DIN EN 1992-1-1, 2011) werden folgende Grenzwerte zur Begrenzung der Verformung empfohlen.

Tabelle 3-3: Übersicht empfohlener Durchhänge nach DIN EN 1992-1-1

Maßgebende Betrachtung	Maximaler Durchhang
Beeinträchtigung des Erscheinungsbild und Gebrauchstauglich für Platten und Balken:	l/250
Beschädigung an angrenzende Bauteile infolge Verformungen:	l/500

Weiterhin gibt die DIN EN 1992-1-1 die Möglichkeit vor, dass eine Schalungsüberhöhung von maximal l/250 aus zu führen ist, um den Durchhang teilweise oder zur Gänze zu kompensieren. Unter Kapitel 5.1.1 werden verschiedenen Deckensituationen mit wechselnden Belastungen untersucht, wodurch im Rahmen einer Vordimensionierung die zu erwartende Verformungen aus der planmäßigen Belastung sowie aus Kriechen und Schwinden ermittelt wurden. Die Ergebnisse wurden anhand von versuchstechnischen Untersuchungen verifiziert.

4 Gebaute Objekte

4.1 Beispiele

4.1.1 Vorbemerkungen

Nachfolgend werden 13 Projektbeispiele aus Deutschland, Österreich und der Schweiz mit ihren wichtigsten Projektinformationen und Ausführungsdetails vorgestellt, die von 2008 bis 2015 in Hybridbauweise errichtet wurden. In Abbildung 4-1 sind die Projekte nach der Ausführung der Außenwand gegliedert. Der Fokus liegt dabei auf nichttragenden HRB-Elementen im Neubau. Ferner kommen nichttragende HRB-Wandelemente zur Ertüchtigung von Bestandsgebäuden vielfach zum Einsatz. Zur Gegenüberstellung wird ein Projektbeispiel mit tragenden Wandelementen im Hybridbau aufgezeigt. Das Projekt „Woodscrapper“ dient als Ausblick für Weiterentwicklungsmöglichkeiten der Hybridbauweisen. Tabelle 4-1 gibt einen Kurzüberblick über die wichtigsten Projekteigenschaften, bevor diese in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert werden.

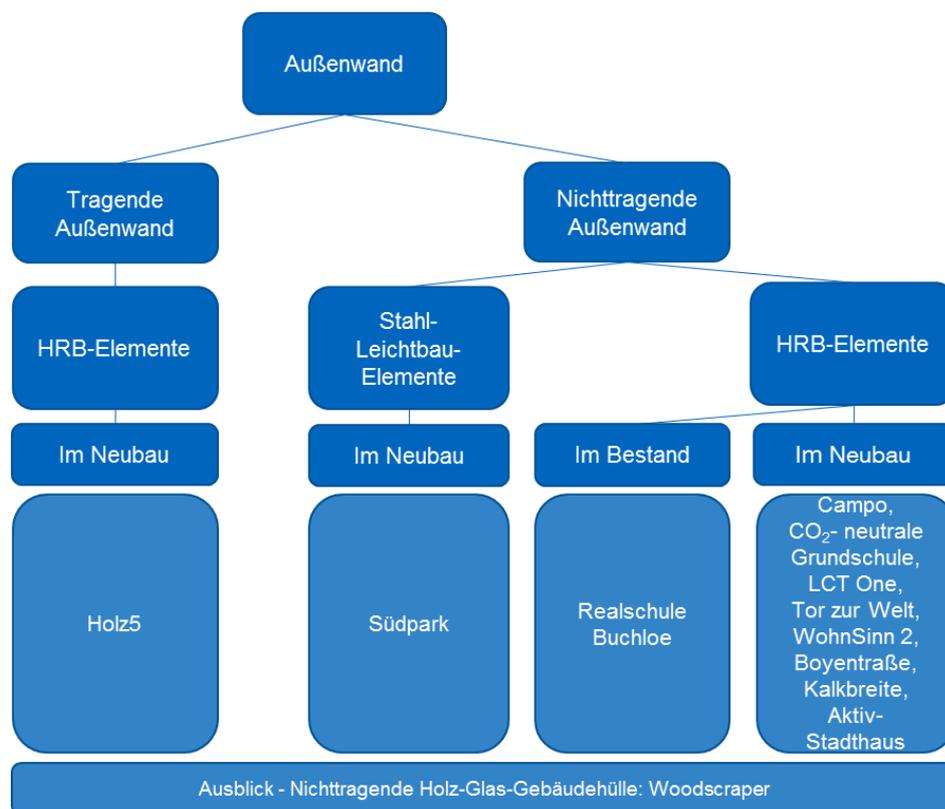


Abbildung 4-1: Projektübersicht nach Ausführung der Außenwand (Eigene Darstellung)

Tabelle 4-1: Projektübersicht gegliedert nach Standort, Baujahr, Geschosshöhe, Fassadenausführung und Tragsystem

Kapitel	Projekt					Fassade		Tragsystem
	Name	Standort	Jahr	Geschosshöhe	System	Anschluss		
4.1.2	WohnSinn 2	D Darmstadt	2008	3	Nichttragende HRB-Elemente	Eingestellt	Stahlbeton-Schottenbau	
4.1.3	Campo	D Frankfurt a.M.	2008	5	Nichttragende HRB-Elemente	Vorgehängt	Stahlbeton-Schottenbau	
4.1.4	Realschule Buchloe	D Buchloe	2011	3	Nichttragende HRB-Elemente (TES Energy Facade)	Vorgehängt	Bestand	
4.1.5	LCT One	A Dornbirn	2011	8	Nichttragende HRB-Elemente	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)	Modulare Holz-Systembau mit HBV-Decken	
4.1.6	Südpark Basel	C H Basel	2012	10	Nichttragende Stahl-Leichtbau-Elemente	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)	Stahlbeton-Skelettbau mit vorgesp. Flachdecken	
4.1.7	Neubau eines 7-geschossigen Wohngebäudes	D Berlin	2012	7	Nichttragende HRB-Elemente	Eingestellt	Stahlbeton-Skelettbau	
4.1.8	Boyenstraße 7-geschossiges Nullemissionshaus	D Berlin	2012	7	Nichttragende HRB-Elemente	Eingestellt	Stahlbeton-Schottenbau	
4.1.9	Bildungszentrum „Tor zur Welt“	D Hamburg	2013	3	Nichttragende HRB-Elemente	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)	Stahlbeton-Skelettbau	
4.1.10	CO2- neutrale Grundschule Neubau	D Hamburg	2013	3	Nichttragende HRB-Elemente	Vorgestellt	Stahlbeton-Tischkonstruktion sowie Holzbauweise	
4.1.11	Holz5	D Bad Aibling	2013	5	Tragende HRB-Wand	-	Holz-Beton-Hybridsystem	
4.1.12	Kalkbreite Zürich	C H Zürich	2014	8	Nichttragende HRB-Elemente	Vorgehängt	Stahlbeton-Plattenstützenbau	
4.1.13	Aktiv-Stadthaus	D Frankfurt a.M.	2015	8	Nichttragende HRB-Elemente	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)	Stahlbeton-Mauerwerks-Schottenbau	
4.1.14	Woodscrapper	- -	-	-	Nichttragende Holz-Glas-Gebäudehülle	-	Stahlbetonkern	

4.1.2 WohnSinn 2 – Darmstadt

Objekt-Nr.	01	Land/ Bundesland	Deutschland
	Passivhaus- Wohnanlage		Hessen
	WohnSinn 2		2008
		Bauordnung	HBO 2006
Standort	Erika-Köth-Weg 2 Anna-Beyer-Weg 2 64289 Darmstadt - Kranichstein	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  faktor 10 mbH	
Nutzung	Wohnen	Bild 2 Außenansicht Montage  faktor 10 mbH	
Gebäude	3-Geschosser		
Planer	Architektur	faktor 10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH Herta-Mansbacher-Straße 124 64289 Darmstadt www.faktor10.com	
	Tragwerk, Bauphysik, Brandschutz	bauart Konstruktions GmbH & Co. KG Spessartstraße 13 36341 Lauterbach/Hessen www.bauart-konstruktion.de	
	Haustechnik	Ingenieurbüro Dipl.-Ing. Hans Baumgartner Groß-Breitenbach 25 69509 Mörlenbach	
Bauphysik	Energiestandard	Passivhaus	
	U-Wert Fassade	0,12 - 0,14 W/(m²K)	
	U-Wert Fenster	0,8 W/(m²K)	
Ausführung	Tragwerk	Beton Kemmler GmbH Rittweg 35 72070 Tübingen www.betonkemmler.de	
	Fassade	Firma Baumgarten GmbH Feuersteinsmühle 5 36157 Ebersburg www.baumgarten-bauen.de	

Bauweise	Tragwerk	Vorelementierte Stahlbeton-Schottenbauweise U-förmiger Anbau an WohnSinn 1
	Gebäudehülle (Kern)	Hochwärmegeämmte, nichttragende Fasadenelemente als vorgefertigte Holzrahmenbau- Elemente
	Fassade	Putzfassade bzw. hinterlüftete Fassade mit Eternitplatten
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Eingestellt
Bauteile	Decken	<u>Geschossdecke</u> 15 mm Fußbodenbelag 6 mm TSD 240 mm Stahlbetondecke <u>Bodenplatte</u> 15 mm Fußbodenbelag 30 mm Asphaltestrich 25 mm TSD 250 mm Stahlbetonbodenplatte 300 mm Dämmung
	Dach	<u>Flachdach</u> 100 mm Substrat Dachfolie 280 mm PU-Dämmung WLS 025 Dampfsperre 240 mm Stahlbetondach
	Außenwände	<u>Loggiabereich</u> 15 mm Schalung 30/50 mm Traglattung Folie 10 mm Putzträgerplatte Bluclad 60 mm Holzweichfaserplatte 300 mm LSL/ Zellulosedämmung 15 mm GF-Platte Folie (Dampfsperre) 12,5 mm GKF-Platte <u>Hausbereich</u> 5 mm Putz 10 mm Putzträgerplatte Bluclad 60 mm Holzweichfaserplatte 300 mm LSL/ Zellulosedämmung 15 mm GF-Platte Folie (Dampfsperre) 12,5 mm GKF-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Passivhaus mit Wärmerückgewinnungsanlage mit permanenter Frischluftzufuhr und Abfuhr der verbrauchten Luft – Wärmebrückenoptimierte Anschlüsse der Passivhausbauweise – Dachbauteile als Stahlbetondächer mit Aufdachdämmung – Auszeichnung als Hessenhaus – Auszeichnung als "Effizienzhaus" im Bundeswettbewerb "Energieeffizienz und gute Architektur" 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – bauart Konstruktions GmbH & Co. KG – faktor 10 Gesellschaft für Siedlungs- und Hochbauplanung mbH – Eternit Aktiengesellschaft (Hrsg.) (2011). Gesundes Wohnen mit Faserzement im Passivhausbau. <i>ETERNIT Passivhaus – REPORT</i>, 01/11. 	

4.1.3 Campo – Frankfurt am Main

Objekt-Nr.	02	Land/ Bundesland	Deutschland Hessen		
	Campo am Bornheimer Depot			Baujahr	2008
				Bauordnung	HBO 2002
Standort	Am Bornheimer Depot Heidestraße 141-147 60385 Frankfurt a. Main	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  bauart Konstruktions GmbH & Co. KG			
Nutzung	Wohnen Kindergarten Supermarkt	Bild 2 Außenansicht Montage  AS&P - Albert Speer & Partner GmbH			
Gebäude	5-Geschosser				
Planer	Architektur	AS&P - Albert Speer & Partner GmbH Hedderichstraße 108 60596 Frankfurt am Main www.as-p.de			
	Tragwerk, Bauphysik, Brandschutz	bauart Konstruktions GmbH & Co. KG Spessartstraße 13 36341 Lauterbach www.bauart-konstruktion.de			
	Haustechnik	Ing.-Büro Hausladen GmbH Feldkirchener Straße 7a 85551 Kirchheim www.ibhausladen.de			
Bauphysik	Energiestandard	Passivhaus			
	U-Wert Fassade	0,12 W/(m²K)			
Ausführung	Fassade	MERKLE GmbH Fabrikstraße 31 73266 Bissingen a. d. Teck www.merkle-holzbau.de			
	Fenster	KOCHS GmbH Am Boscheler Berg 5 52134 Herzogenrath-Merkstein www.kochs.de			

Bauweise	Tragwerk	Stahlbeton-Schottenbau
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigte Wandtafeln als nichttragende Fassadenelemente in Holzrahmenbauweise mit anschließendem Fenstereinbau bzw. WDVS-Anbringung
	Fassade	Wärmeverbundsystem (WDVS)
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgehängt
Bauteile	Decken	<u>Deckenaufbau</u> < 22 mm Fußbodenaufbau 25 mm Trockenestrich 30 mm TSD 50 mm Ausgleichsschüttung (Rohbautoleranzen, Installation) 250 mm Stahlbetondecke
	Außenwände	<u>Wandaufbau</u> 140 mm WDVS WLS 035 15 mm GF-Platte 60/ 180 mm KVH/ Mineralwollgedämmung WLS 035 15 mm HWS-Platte (OSB) 12,5 mm GK-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Passivhausstandard – Belobigung Städtebaupreis 2010 – Green Building Award der Stadt Frankfurt in 2011 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – AS&P - Albert Speer & Partner GmbH – bauart Konstruktions GmbH & Co. KG 	

4.1.4 Realschule Buchloe – Buchloe

Objekt-Nr.	03 Realschule Buchloe	Land/ Bundesland	Deutschland Bayern
		Baujahr	2011
		Bauordnung	BayBO 2009
Standort	Münchenerstraße 2 86807 Buchloe	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  Anton Ambros GmbH	
Nutzung	Schule	Bild 2 Außenansicht Montage  Anton Ambros GmbH	
Gebäude	3-Geschosser		
Planer	Architektur	e3.architekten Architekturbüro Ruderatshofener Str. 4 87616 Marktoberdorf	
	Tragwerk	Mühlberg beratende Ingenieure GmbH Heinz-Strachowitz-Str. 4 86807 Buchloe www.mbi-muehlberg.de	
	Brandschutz	Ingenieurbüro Schulz Bahnhofstraße 39 c 86807 Buchloe	
	HLS	Ingenieurbüro Fink + Janda GbR Wiesstraße 13 a 87435 Kempten www.ib-fink-janda.de	
	Elektrotechnik	Ing.-büro Körbl + Feneberg GbR Brunnengasse 10 87629 Füssen www.ib-kuf.de/home	

Ausführung	Baumeister	J. Dobler GmbH & Co. Innovapark 20 87600 Kaufbeuren www.dobler.de
	Fassade	Anton Ambros GmbH Hauptstraße 5 87659 Hopferau www.ambros-haus.de
	WDVS	Limo-Therm Fassaden GmbH Gewerbepark 1 87640 Biessenhofen www.limo-therm.de
Bauweise	Tragwerk	Bestand 70er Jahre Stahlbetonskelettbau
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigter Holzfassaden-Elemente als komplett vorgefertigte, nichttragende Holzständerkonstruktion inkl. Fenster (TES Energy Facade)
	Fassade	Hinterlüftete Fassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgehängt
Bauteile	Decken, Dach	Bestand
	Außenwände	<u>Wandaufbau</u> 28 mm Lärchenbrett, 28/70-150 mm 40/ 40 mm Traglattung Schwarze Fassadenmembran 15 mm HWS-Platte (OSB) 60/ 100 mm KVH/ Mineralwolle WLS 035 100/ 200 mm BSH/ Mineralwolle WLS 035 15 mm HWS-Platte (OSB)
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Passivhausstandard – Fassadensanierung an Bestandsbau mit TES Energy Facade 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Anton Ambros GmbH – Mühlberg beratende Ingenieure GmbH 	

4.1.5 LCT One – Dornbirn

Objekt-Nr.	04 LCT (LifeCycleTower) One	Land/ Bundesland	Österreich Vorarlberg
		Baujahr	2011-2012
		Bauordnung	OIB 2011
Standort	Färbergasse 15 A-6850 Dornbirn	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH	
Nutzung Gebäude	Büro 8-Geschosser (Erstes Holzgebäude an der Hochhaus- grenze in Österreich)	Bild 2 Außenansicht Montage  Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH	
Planer	Architektur	Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH Sportplatzweg 5 A-6858 Schwarzach www.hermann-kaufmann.at	
	Tragwerk	merz kley partner AG Sägerstraße 4 A-6850 Dornbirn www.mkp-ing.com	
	Fassade	gbd ZT GmbH Steinebach 13 A-6850 Dornbirn www.gbd.at	
	Bauphysik	Dipl. Ing. Bernhard Weithas GmbH Rosenweg 3c A-6923 Lauterach www.weithas.com	
Planer	Brandschutz	IBS-Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung GmbH Petzoldstraße 45 A-4017 Linz www.ibs-austria.at	
Bauphysik	Energiestandard	Passivhaus	
	U-Wert Fenster	0,12 W/(m²K)	
	U-Wert Fassade	50% der Fassadenfront, 3-fach-Verglasung	

Ausführung	Hybriddecke (Fertigteilbau)	Goldbeck Prefabeton Chrudimská 42, CZ - 285 71 Vrďy www.prefabeton.cz
	Holzbau	Sohm HolzBautechnik GmbH Bübel 818, A-6861 Alberschwende www.sohm-holzbau.at
Bauweise	Tragwerk	Systembauweise (Prototyp): – Modulare Holz-Systembauweise im Rasterformat – Aussteifender Stiegenhauskern aus Ortbeton – Vorgefertigte Holz-Beton-Verbunddecken (~3,00 m x 8,50 m) mit Schubkernen – Doppelstützen aus BSH
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigte nichttragende Fassadenmodule in Holzrahmenbauweise mit innen sichtbarem Holztragwerk
	Fassade	Hinterlüftete Fassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)
Bauteile	Decken	<u>HBV-Geschossdecke REI 90</u> 10 mm Fußbodenbelag 34 mm Hohlbodenplatte 96 mm Luftschicht / Unterkonstruktion 80 mm Stahlbeton 280 mm BSH-Balken, 280/ 2x240 mm, e = 1,35 m
	Dach	<u>HBV-Flachdach</u> 50 mm Kies Vlies Abdichtungsbahn 500-620 mm Gefälledämmung EPS WLS 038 Bitumenbahn 80 mm Stahlbeton 280 mm BSH-Balken, 280/ 2x240 mm, e = 1,35 m
Bauteile	Außenwände	<u>Fassadenmodul</u> 6 mm Recycelte Aluminiumfassade Profile 6 mm, e = 728 mm/ 622 mm (Z-33.2-1012) 82 mm Traglattung 18 mm Zementgeb. Holzfaserplatte 60/ 320 mm KVH, e = 432 mm/ Steinwollgedämmung 18 mm HWS-Platte (OSB) 30/ 50 mm Lattung 18 mm Spanplatte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Projekt aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Haus der Zukunft“ des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie – Schweighofer Innovationspreis – Holzbaupreis Vorarlberg (Preis Holzmischaubauweise) – German Council of Shopping Centers (Erster Preis Kategorie "Innenstadt") – Constructive Alps - Commendation Award – KYOCERA-Umweltpreis für nachhaltige Projekte und Technologien 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH – Cree GmbH – Kaufmann, H. & Strauch, R. (2012). Ressourcenschonung durch Synergie: Holzbauten in Holz-Hybridbauweise. <i>DETAILGreen</i>, 02/2012, S. 48–53. – Lennartz, M. W. (2012). Nachhaltig in die Höhe: Bürogebäude. <i>mikado</i>, 07/2012, S. 20–23. 	

4.1.6 Südpark – Basel

Objekt-Nr.	05 Gebäudekomplex Südpark	Land/ Bundesland	Schweiz Basel-Stadt
		Baujahr	2010-2011
		Bauordnung	Bau- und Planungsgesetz (BPG) Basel Stadt
Standort	Meret Oppenheim- Straße 62 CH-4052 Basel	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung 	
Nutzung	Wohn- und Geschäftshaus mit Seniorenresidenz	Bild 2 Außenansicht Montage 	
Gebäude	10-Geschosser	ERNE AG Holzbau	
Planer	Architektur	Herzog & de Meuron, Basel Rheinschanze 6 CH-4056 Basel www.herzogdemeuron.com	
	Tragwerk	ZPF Ingenieure AG Kohlenberggasse 1 CH-4051 Basel www.zpfingag.ch	
	Fassade	<u>Planung in der Konzeptphase</u> Emmer Pfenninger Partner AG Weidenstrasse 13, CH-4142 Münchenstein www.eppag.ch/de <u>Planung in der Ausführung</u> Neuschwander + Morf AG Innere Margarethenstrasse 26, CH-4051 Basel www.nm-ag.ch/index2.htm	

Bauphysik	U-Wert Fenster	U _w = 1.35 W/m ² K (Anford. U _w ≤ 1.4 W/m ² K) U _g = 1.10 W/m ² K (Anford. U _w ≤ 1.1 W/m ² K)
	U-Wert Fassade	U _p = 0.24 W/m ² K Anford. U ≤ 0.25 W/ m ² K)
Ausführung	Tragwerk	Rofra Bau AG Weidenring 34 CH-4147 Aesch www.rofrabau.ch
	Fassade	ERNE Holzbau AG Werkstrasse 3 CH-5080 Laufenburg www.erne.net
Bauweise	Tragwerk	Stahlbeton-Skelettbau Vorgespannte Flachdecken Komplett verglastes Erdgeschoss
	Gebäudehülle (Kern)	Nichttragende, vorgefertigte Rahmenelemente aus Stahl-Leichtbauprofilen mit Holz-Metall-Fenstern (3,13 m x max. 8,37 m)
	Fassade	Hinterlüftete Fassade mit Trägerplatte
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)
Bauteile	Decken	<u>Loggiadecke</u> 30 mm Diele Lärche Trägerrost/ Distanzhalter Abdichtung 70-110 mm Gefälledämmung 240 mm Stahlbetondecke
	Außenwände	<u>Wandaufbau</u> 3 mm Feinputz 12 mm Trägerplatte Blähglasgranulat 40 mm Unterkonstruktion Aluminium 80 mm Dämmung Dichtungsbahn 15 mm Holzzementplatte 150 mm Stahlprofil 150/40/ Mineralwollgedämmung Dampfsperre 15 mm GF-Platte 12,5 mm GK-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Entwicklung der scheinbar freie Anordnung von zwölf unterschiedlichen Fensterformaten durch die Architekten Herzog & de Meuron in Zusammenarbeit mit dem CAAD-Lehrstuhl der ETH Zürich – Herstellung der Fassadenelemente in eigens dafür entwickelter Produktionsstraße – Gleitende Befestigung der Fassadenelemente im Sturzbereich um Verformungen aufnehmen zu können – Rückhalterungen zur Gewährleistung der Erdbebensicherheit – Erstellung eines projektbezogenen Verbindungsmittelkatalogs 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – ERNE AG Holzbau – Herzog & de Meuron Basel Ltd. Homepage – ZPF Ingenieure AG Homepage – Herzog & de Meuron, Basel (2015). Wohn- und Geschäftshaus mit Seniorenresidenz in Basel. <i>DETAIL</i>, 04/2015, S. 350–354. 	

4.1.7 7-geschossiges Wohngebäude – Berlin

Objekt-Nr.	06 Neubau eines 7- geschossigen Wohngebäudes	Land/ Bundesland	Deutschland/ Berlin
		Baujahr	2012
		Bauordnung	BauO Bln 2005
Standort	Boyenstraße 27 10115 Berlin	<p><u>Bild 1</u> Außenansicht nach Fertigstellung</p>  <p>Kaden + Partner Architekten</p>	
Nutzung	Wohnen		
Gebäude	7-Geschosser		
Planer	Architektur	Kaden + Klingbeil Architektur mit Holz Esmarchstraße 3 10407 Berlin www.kadenundpartner.de	
	Holzbau, Bauphysik	PIRMIN JUNG Deutschland GmbH Entenweiherweg 12 53489 Sinzig www.pirminjung.de	
	Brandschutz	Dehne, Kruse Brandschutzingenieure GmbH & Co. KG Gustav-Schwanneke-Str. 13 38518 Gifhorn www.kd-brandschutz.de	
	Haustechnik (Lüftungsanlagen)	Planungsbüro Roth Heizung - Klima - Sanitär – Versorgungstechnik Hegermühlenstraße 19 15344 Strausberg www.pb-roth.de	
Bauphysik	Energiestandard	EnEV 2009 – KfW 55	
	U-Wert Fassade	0,18 W/(m²K)	
	U-Wert Fenster	U _w = 0,90 W/(m²K)	
	Fassade	Zimmerei Sieveke GmbH Bakumer Str. 24 49393 Lohne www.sieveke.de	

Bauweise	Tragwerk	Stahlbeton-Skelettbauweise mit tragenden Stahlstützen in den Drittelpunkten der Außenwände
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigte, nichttragende Fassadenmodule in Holzrahmenbauweise
	Fassade	Wärmedämmverbundsystem (WDVS)
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Eingestellt
Bauteile	Decken	<p>Holz- Stahlbetonverbundbauweise Vorfertigungsgrad 40%</p> <p><u>Geschossdecke</u> 22 mm Fußbodenbelag 70 mm Heizestrich 20 mm Tackersystem-Platte 20-C2 75 mm TSD Trennlage 178 mm Stahlbeton 42 mm BFU-Platte</p> <p><u>Kellerdecke</u> 60 mm Anhydrit-Estrich 60 mm Bodendämmplatte EPS WLS 035 200 mm Leichtbeton Akustik-Dämmplatte WLS 035</p>
	Dach	<p><u>Flachdach</u> 80 mm Sand- und Kiesschüttung 200 mm Gefälledämmung EPS WLS 035 260 mm Stahlbeton-Holzverbund</p> <p><u>Treppenhausdach</u> 180 mm Flachdachdämmplatte EPS WLS 035 150 mm Stahlbeton 10 mm Gipsputz</p>
	Außenwände	<p><u>Wandaufbau</u> 5 mm Putz 60 mm WDVS Mineralwolle 18 mm GF-Platte 240 mm KVH / Mineralfaserdämmung 18 mm HWS-Platte (OSB3) 18 mm GF-Platte</p>
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Gebäudeklasse 5 → Brandschutznachweis F90-AB durch allseitige Einkapselung der Holzkonstruktion mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (fermacell Gipsfaser-Platten, F120 A2), Raumseitiger Schutz vor Entzündung der Holzkonstruktion durch eine Beplankung mit 2x18 mm fermacell Gipsfaser-Platten, Vollständige Dämmung der Hohlräume der Konstruktion mit 24 cm dicker Mineralwolle (Schmelzpunkt über 1000°C) – Kapselklasse K260 durch Kombination von Steinwollelamellen (8 cm) und einer einlagigen Beplankung mit 15 mm dicken Fermacell-Gipsfaser-Platten; Abschluss durch eine Bekleidung mit 8 mm dicken Faserzementplatten (nichtbrennbare Oberfläche) 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Kaden + Partner Architekten, Berlin – Planungsbüro Roth, Strausberg – Projektdokumentation 	

4.1.8 7-geschossiges Nullemissionshaus – Berlin

Objekt-Nr.	07 Boyenstraße 7-geschossiges Nullemissionshaus	Land/ Bundesland	Deutschland Berlin
		Baujahr	2012-2013
		Bauordnung	BauO Bln 2011
Standort	Boyenstraße 34/35 10115 Berlin	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  Deimel Oelschläger - Architekten Partnerschaft	
Nutzung Gebäude	Wohnen 7-Geschosser	Bild 2 Außenansicht Montage  Deimel Oelschläger - Architekten Partnerschaft	
Planer	Architektur, Bauphysik	Deimel Oelschläger Architekten Partnerschaft Wattstrasse 11 – 13 13355 Berlin www.deo-berlin.de	
	Tragwerk	Gesamtstatik Ingenieurbüro Rüdiger Jockwer GmbH Pfuelstraße 5, Aufgang 4 10997 Berlin www.jockwer-gmbh.de Fassade Bauplanungsbüro Bauer Querstraße 44 04741 Roßwein www.bauplanung-bauer.de	
Planer	Haustechnik	AEH Ingenieure Abig-Eichelser-Hanka GmbH Brunnenstr. 181 10119 Berlin www.ib-ae.de	

Bauphysik	Energiestandard	PHPP (s. Sonstiges)
	U-Wert Fassade	0,245 W/(m²K)
Ausführung	Tragwerk	mib Märkische Ingenieur Bau GmbH Ratsstraße 7 16269 Wriezen www.mib-bau-wriezen.de
	Fassade	MOSER Haus GmbH Hauptstr. 72 09634 Hirschfeld www.holzbau-moser.de
Bauweise	Tragwerk	Stahlbeton-Schottenbauweise
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigte, nichttragende Holztafelelemente mit Zellulosedämmung
	Fassade	Hinterlüftete Fassade bzw. Putzfassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Eingestellt
Bauteile	Decken	<u>Geschossdecke</u> 22 mm Fußbodenbelag (Parkett) 50 mm Zementestrich Dichtungsbahn 30 mm TSD 230 mm Stahlbetondecke <u>Kellergeschoss</u> 10 mm Fußbodenbelag (Mosaikparkett) 50 mm Zementestrich Dichtungsbahn 20 mm TSD 80 mm Ausgleichsdämmplatte 700 mm Bodenplatte WU-Beton
	Außenwände	<u>Hinterlüftetes Fasadenelement</u> 115 mm Faserzementplatte Luftschicht Holzweichfaserdämmung WLS 040 15 mm HWS-Platte (DHF) 60/ 240 mm KVH/ Zellulosefüllung WLS 040 15 mm HWS-Platte (OSB) 60 mm Dämmung mineralisch WLS 035 2x 12,5 mm GKF-Platte <u>Putzfasadenelement</u> 15 mm Putz 60 mm Holzweichfaserdämmung WLS 040 15 mm HWS-Platte (DHF) 60/ 240 mm KVH/ Zellulosefüllung WLS 040 15 mm HWS-Platte (OSB) 60 mm Dämmung mineralisch WLS 035 2x 12,5 mm GKF-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Erstes Mehrfamilien-Null-Energiehaus Berlins – Klimaschutzpreis der Berliner Wirtschaft 2012 – Passivhouse Award 2014 in der Kategorie Mehrfamilienhäuser 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Deimel Oelschläger - Architekten Partnerschaft – Deimel, C. (2012). <i>Vom Passivhaus zum Plusenergiehaus: Berliner Wohngebäude erzeugt mehr Primärenergie als es verbraucht</i>. Energie-ImpulsE, 02/2012, S. 8–9. 	

4.1.9 Bildungszentrum „Tor zur Welt“ – Hamburg

Objekt-Nr.	08 Bildungszentrum „Tor zur Welt“	Land/ Bundesland	Deutschland Hamburg
		Baujahr	2011-2013
		Bauordnung	HBO 2010
Standort	Krieterstraße 2 21109 Hamburg	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  bof architekten	
Nutzung	Schule	Bild 2 Außenansicht Montage  bof architekten, fermacell	
Gebäude	3-Geschosser		
Planer	Architektur	bof architekten Schillerstr. 47-49 22767 Hamburg www.bof-architekten.de	
	Tragwerk	Schumacher + Gerber Hermann-Maul-Str. 5 21073 Hamburg www.sg-ing.de	
	Brandschutz	<u>Brandschutzgutachten Gebäude: WTM Engineers</u> Johannissbollwerk 6-8 20459 Hamburg www.wtm-engineers.de <u>Brandschutzgutachten Fassade: Ingolf Kotthoff</u> Feuerbachstr. 8 04105 Leipzig	
	Haustechnik, Energiekonzept, Bauphysik	<u>EGS-plan</u> Gropiusplatz 10 70563 Stuttgart www.stz-egs.de <u>Ingenieurbüro Ridder & Prigge GmbH & Co. KG</u> Lornsenstraße 128-130 22869 Schenefeld www.tga-ridder.de	
Bauphysik	Energiestandard	Passivhaus (nicht zertifiziert, nur berechnet)	
	U-Wert Fassade	0,135 W/(m²K)	
	U-Wert Fenster	Uw = 0,71 W/(m²K) Fenster Lochfassade Uf = 0,99 W/(m²K) Fenster Lochfassade	
Ausführung	Baumeister, Tragwerk	Firmengruppe Riedel Bau Silbersteinstraße 4, 97424 Schweinfurt www.riedelbau.de	

Ausführung	Fassade	Zimmerei Sieveke GmbH Bakumer Str. 24 49393 Lohne www.sieveke.de
Bauweise	Tragwerk	Stahlbeton-Skelettbauweise
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigte Fassadenelemente in Holzrahmenbauweise inkl. Fenster und Sonnenschutz sowie vor Ort durch innere Installationsschicht und äußere Holzbeplankung ergänzt
	Fassade	Hinterlüftete Fassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)
Bauteile	Decken	<u>Geschossdecke</u> 20 mm Fußbodenbelag (Parkett) 70 mm Estrich schwimmend 0,2 mm PE-Folie zweilagig 30 mm TSD 300 mm Stahlbetondecke (Ortbeton) <u>Bodenplatte</u> 20 mm Fußbodenbelag (Parkett) 70 mm Estrich schwimmend 0,2 mm PE-Folie zweilagig 30 mm TSD 140 mm Wärmedämmung EPS WLS 035 Bitumendichtungsbahn 2-lagig 250 mm Stahlbetonplatte WU-Beton 100 mm Perimeterdämmung > 200 mm Drainageschicht/ PE-Folie Kies/Sand
	Dach	Flachdach / Kaltdach >5° Gefälle 65 mm Aluminiumfalzeindeckung 400-537 mm Stahl-Leichtkonstruktion 1 mm Antikondensat-/ Antidröhnbeschichtung <u>Oberste Geschossdecke</u> 360 mm Mineralwolledämmung WLS 035 Abdichtungsbahn 250 mm Stahlbetondecke
	Außenwände	<u>Holzelementfassade</u> 25 mm Stülpchalung 35 mm Traglattung 15 mm Zementgeb., glasfaserbewehrte Sandwichplatte (Z-31.1-176) 260 mm KVH/ Dämmung WLS 035 0,2 mm PE-Folie 15 mm GF-Platte 75 mm KVH/ Mineralwolledämmung WLS 035 2x 12,5 mm GKF-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Gebäudeklasse 5 → Brandschutzgutachten mit Zustimmung im Einzelfall – DGNB Gold (vorzertifiziert, Zertifizierung läuft noch) – Preisträger „Architektur mit Energie“ – BMWi Preis Energieoptimiertes Bauen (EnOB) 2009 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – bof architekten: 18. Internat. Passivhaustagung 2014 in Aachen – bof architekten (2014). Bildungszentrum in Hamburg: Pädagogisches Multitalent. <i>DETAILGreen</i>, 02/2014, S. 46–53. 	

4.1.10 CO₂-neutrale Grundschule – Hamburg

Objekt-Nr.	09	Land/ Bundesland	Deutschland Hamburg		
	CO₂-neutrale Grundschule Neubau			Baujahr	2010-2013
				Bauordnung	HBO 2006
Standort	Kleinflottbeker Weg 64 22605 Hamburg	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  Archimage Hamburg/ Meike Hansen/ Eternit			
Nutzung	Schule	Bild 2 Holzrahmenbaumodule			
Gebäude	3-Geschosser	 Trapez Architektur/ Archimage Hamburg/ Meike Hansen			
Planer	Architektur, Holzbau	Trapez Architektur Stadtdeich 7, 20097 Hamburg www.trapez-architektur.de			
	Holzbau, Tragwerk, Brandschutz	Helmut Wiemer Ingenieurgesellschaft für Bauwesen mbH Krohnstieg 41-43, 22415 Hamburg www.wiemer-ingenieure.de			
	Bauphysik	KAplus - Ingenieurbüro Vollert Mühlenstraße 29, 24340 Eckernförde www.kaplus.de			
	Haustechnik (Lüftungsanlagen)	TGA-Planung Iproplan Planungsgesellschaft mbH Bernhardtstraße 68, 09126 Chemnitz www.iproplan.de TGA-Bauleitung ITG Ingenieurbüro für Technische Gebäudeausrüstung Fahrenkrön 116, 22179 Hamburg-Bramfeld www.itg-hamburg.de			
Bauphysik	Energiestandard	EnEV 2009, in Anlehnung an PH			
	U-Wert Fassade	0,124 W/(m ² K)			
	U-Wert Fenster	U _w = 0,912 W/(m ² K), U _f = 0,50 W/(m ² K)			
Ausführung	Baumeister, Tragwerk	Konstruktiver Holzbau: Heinrich Haveloh GmbH Münsterstraße 64, 48683 Ahaus-Alstätte www.haveloh.eu			
	Fassade	Zimmerei Sieveke GmbH Bakumer Str. 24, 49393 Lohne www.sieveke.de			
Bauweise	Tragwerk	EG: Stahlbeton-Tischkonstruktion; OG: Holzbau			

Bauweise	Gebäudehülle (Kern)	Gänzlich vorgefertigte, nichttragende Fassadenelemente in Holzrahmenbauweise
	Fassade	Hinterlüftete Fassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgestellt
Bauteile	Decken	<u>Fußbodenaufbau:</u> 10 mm Werkstein 5 mm Dünnbettmörtel 75 mm Zementestrich 0,2 mm PE-Folie 20 mm TSD <u>Weiterer Deckenaufbau EG:</u> 30 mm Dämmung 300 mm Stahlbeton <u>Weiterer Aufbau Bodenplatte (z.B. Flur):</u> 60 mm Dämmung 350 mm Stahlbeton 100 mm Dämmung
	Dach	Kunststoff-Dachabdichtungsbahn Brandschutzlage 100 mm Dämmstoff EPS WLS 035 22 mm HWS-Platte (OSB3) 240 mm Zwischensparrendämmung Unterspannbahn
	Außenwände	<u>Kernelement</u> 40 mm Holzweichfaserdämmplatte 240 mm KVH/ Steinwollgedämmung WLS 035 15 mm HWS-Platte (OSB4) 12,5 mm GF-Platte <u>Fassade mit Eternit</u> 8 mm Faserzementplatte (Z-31.4-183) 40 mm Vertikale Lattung 150 mm Horizontale Lattung <u>Fassade im Sockel- und Treppenhausbereich</u> 60-80 mm Holzlamellen 40 mm Vertikale Lattung 40 mm Horizontale Lattung Unterspannbahn <u>Wandaufbau, Übergang zu Bodenplatte</u> Sockelblech, Abklebung bituminös 25 mm Perimeterdämmung 12,5 mm Zementgeb. Spanplatte 240 mm KVH/ Steinwollgedämmung WLS 035 15 mm HWS-Platte (OSB4) 12,5 mm GF-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Sporthalle: Passivhausstandard – Besonderheiten: CO₂-neutral – Elemente bis 3,45 m hoch und 12,5 m lang (genehmigungspflichtige Sondertransporte) – 1. Platz beim Realisierungswettbewerb 2007 (in Zusammenarbeit mit Götz Schünemann), ausgewählt für den Tag der Architektur in Hamburg 2013 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Trapez Architektur – Krause, J. (2013). Kleiner Fußabdruck, große Qualitäten. <i>Lignardo</i>, 02/2013, S. 40-51. 	

4.1.11 Holz5 – Bad Aibling

Objekt-Nr.	10 Holz5	Land/ Bundesland	Deutschland Bayern
		Baujahr	2013
		Bauordnung	BayBO 2009
Standort	„Wohlfühlquartier“ Nullenergiestadt B & O-Parkgeländes 83043 Bad Aibling	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  SCHANKULA Architekten / B&O Gruppe	
Nutzung	Wohnen		
Gebäude	5-Geschosser		
Planer	Architektur	SCHANKULA Architekten Magnolienweg 6 81377 München www.schankula.com	
	Tragwerk, Brandschutz	bauart Konstruktions GmbH & Co. KG Spessartstraße 13 36341 Lauterbach/Hessen www.bauart-konstruktion.de	
	Bauphysik	Dr. Burkhard Schulze-Darup Nürnberg, und ift Schallschutzzentrum Theodor-Gietl-Str.7-9 83026 Rosenheim www.ift-rosenheim.de/labor-bauakustik	
Bauphysik	Energiestandard	Passivhaus im „Energie-Plus-Standard“	
	U-Wert Fassade	0,137 W/(m²K)	
	U-Wert Fenster	Fenster 075	
Ausführung	Tragwerk	<u>Holzbau</u> Huber & Sohn GmbH & Co. KG, Wasserburger Straße 4 83549 Bachmehring www.huber-sohn.de	

Ausführung	Tragwerk	<u>Massivbau</u> Sebastian Pauker Bauunternehmen GmbH Unterdorfstr. 7 83549 Alteiselfing www.pauker-bau-gmbh.de
	Fassade	Huber & Sohn GmbH & Co. KG Wasserburger Straße 4 83549 Bachmehring www.huber-sohn.de
Bauweise	Tragwerk	Holz-Beton-Hybridsystem als Kombination von Holz- und Betonelementen <ul style="list-style-type: none"> - Schottenbauweise mit massiven Innenwänden als Halbfertigteile und Außenwänden als vorgefertigte Holzständerwänden - Decken als vorgefertigte Spannbetonelemente
	Gebäudehülle (Kern)	Tragende Holzständerwänden mit fertiger Oberfläche und eingebauten Fenstern
	Fassade	Holzschalung mit Hinterlüftung
Bauteile	Decken	<u>Geschossdecke</u> 16 mm Fußbodenbelag (Holzdielen) 4 mm Kleber 50 mm Zementestrich 35 mm TSD 20 mm Ausgleichslage Styropor 40 – 70 mm Schüttung 200 mm Spannbetonelement
	Außenwände	<u>Wandaufbau</u> 20 mm Holzschalung 38 mm Traglattung Fassadenbahn 2x 18 mm GF-Platten 300 mm KVH/ Mineralwollgedämmung 2x 18 mm GF-Platten Folie (Dampfbremse)
	<ul style="list-style-type: none"> - Null-Emissions-Quartier - Projektförderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen der Forschungsinitiative EnEff:Stadt - Pilotprojekts eines fünfgeschossigen Holz-Hybridhaus - Einhaltung der Förderkriterien der für den Wohnungsmarkt bedeutendsten Bundesländer Nordrhein-Westfalen, Bayern und Baden-Württemberg 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> - SCHANKULA Architekten - Jahn, J. (2014). Auf Kombination gesetzt: Auf fünf Stockwerken zeigt der „H5“ in Bad Aibling die Vorteile der Kombination aus Holz- mit Betonelementen. <i>Lignardo</i>, 03/2014, S. 16–27. 	

4.1.12 Kalkbreite – Zürich

Objekt-Nr.	11 Kalkbreite Zürich	Land/ Bundesland	Schweiz Zürich
		Baujahr	2012-2014
		Bauordnung	Schweizer Bauordnung
Standort	Kalkbreitestrasse 2 CH-8003 Zürich	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung 	
Nutzung	Wohn – und Gewerbebau	Bild 2 Außenansicht Montage 	
Gebäude	8-Geschosser	Müller Sigrist Architekten AG	
Planer	Architektur, Tragwerk	Müller Sigrist Architekten AG Hildastrasse 14a CH-8004 Zürich www.muellersigrist.ch	
	Holzbau	Makiol und Wiederkehr Dipl. Holzbau-Ingenieure HTL/SISH Industriestrasse 9 CH-5712 Beinwil am See www.holzbauing.ch	
	Bauphysik	BWS Bauphysik AG Hard 4 CH-8408 Winterthur www.bwsag.ch	

Planer	Nachhaltigkeitsbewertung	Planungsbüro Jud AG, Zürich (Mobilität) Durable Planung und Beratung GmbH Gladbachstrasse 33 CH-8006 Zürich www.jud-ag.ch
Bauphysik	Energiestandard	Minergie-P-Eco (= Passivhausstandard)
	U-Wert Fassade	0,12 W/(m²K)
	U-Wert Fenster	< 0,6 bzw. 0,7 W/(m²K)
Ausführung	Baumeister	Anliker AG Hardturmstrasse 161 CH-8005 Zürich www.anliker.ch
	Fassade	Baltensperger AG Hochbau Tiefbau Holzbau Alte Poststrasse 31 CH-8472 Seuzach www.baltenspergerbau.ch/holzbau
Bauweise	Tragwerk	Plattenstützenbau mit vorgefertigten Stützen, Decken und aussteifenden Wände in Ortbeton
	Gebäudehülle (Kern)	Vorgefertigte, nichttragende Fassadenmodule als Holzelemente mit im Werk eingebauten Fensterrahmen
	Fassade	Putzfassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgehängt
Bauteile	Decken	<u>Stahlbetonplatte</u> 60 mm Anhydrit-Unterlagsboden (Bodenheizung) PE-Folie 20 mm TSD 40 mm Dämmung Polystyrol 260 mm Stahlbetondecke
	Außenwände	<u>Nichttragender Außenwandaufbau (R0 EI 30)</u> 15 mm Außenputz 60 mm Diffusermplatte 60/ 240 mm KVH/ Steinwolledämmung WLS 035 15 mm HWS-Platte (OSB) 80 mm Lattung/ Mineralwolle WLS 035 2 x 12,5 mm GF-Platte
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Flexibilität in den Grundrissen – Problemloses Austauschen der Fassade 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Müller Sigrist Architekten AG – Papazoglou, L. (2014). Wohnexperiment über den Tramgleisen: Urbanes Leuchtturmprojekt der Genossenschaft Kalkbreite im Zürcher Kreis 4. Neubau. Wohnen, 05/2014. – Vogt, C. (2014). Hybrider Verwandlungskünstler: Wohn- und Gewerbebau. <i>Lignardo</i>, 03/2014, S. 28–37. 	

4.1.13 Aktiv-Stadthaus – Frankfurt a.M.

Objekt-Nr.	12 Aktiv-Stadthaus	Land/ Bundesland	Deutschland Hessen
		Baujahr	2013-2015
		Bauordnung	HBO 2011
Standort	Speicherstraße 60327 Frankfurt a.M.	Bild 1 Außenansicht nach Fertigstellung  GUMPP & MAIER GmbH	
Nutzung Gebäude	Wohnen 8-Geschosser	Bild 2 Außenansicht Montage  GUMPP & MAIER GmbH	
Planer	Architektur	HHS Planer + Architekten AG Habichtswalder Straße 19 34119 Kassel www.hhs.ag	
	Tragwerk	B+G Ingenieure, Bollinger und Grohmann GmbH Westhafenplatz 1 60327 Frankfurt a. M. www.bollinger-grohmann.com	
	Haustechnik	TU Darmstadt Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen 64287 Darmstadt EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH Gropiusplatz 10 70563 Stuttgart www.stz-egs.de	

Bauphysik	Energiestandard	Effizienzhaus Plus
	U-Wert Fassade	0,127 W/(m ² K)
	U-Wert Fenster	$U_g = 0,50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $U_w = 0,72 - 0,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.
Ausführung	Tragwerk	Ed. Züblin AG Europa-Allee 50 60327 Frankfurt am Main mitte.zueblin.de
	Fassade	Gumpp & Maier GmbH Hauptstraße 65 86637 Binswangen www.gumpp-maier.de
Bauweise	Tragwerk	Stahlbeton-Mauerwerks-Schottenbauweise
	Gebäudehülle (Kern)	Hochwärmegeämmte, nichttragende Fassadenelemente als vorgefertigte Holzrahmenbau-Elemente (maximale Länge: 12,60 m)
	Fassade	Hinterlüftete bzw. hinterlüftete Photovoltaik-Fassade
	Anschlussvariante der Fassade an die Tragkonstruktion	Vorgestellt (Lastabtrag geschossweise)
Bauteile	Decken	<u>Geschossdecke</u> 160 mm Fußbodenaufbau: Fußbodenbelag Estrich TSD 230 -300 mm Stahlbetondecke
	Dach	<u>Flachdach (Kaltdach)</u> 440 mm Sparrenkonstruktion aus Holz Zellulose-Dämmung WLS 025 Dampfsperre 200 mm Stahlbetondach
	Außenwände	<u>Nordfassade</u> 8 mm Faserzementplatten 40 mm Traglattung 15 mm HWS-Platte (DHF) 300 mm BSH, e = 833 mm/ Zellulosedämmung 15 mm HWS-Platte (OSB) 70 mm Installationsebene 10 mm Fuge 2x12,5 mm GKF-Platten <u>Südfassade</u> analog mit vorgehängten, hinterlüfteten Photovoltaik-Modulen Installationsebene durch Trockenbauer vor Ort
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Projekt des Frankfurter Konzepts des energieeffizienten Bauens und Sanierens – Ziel der aktiven Energiegewinnung – Planung des Neubaus im Rahmen der Forschungsinitiative „ZukunftBau“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Gumpp & Maier GmbH – Jacob-Freitag, Susanne (2015): Effizienzhaus. Gebäudehülle. In: <i>mikado</i> (07), S. 22–31. 	

4.1.14 Ausblick – Woodscrapper

Objekt-Nr.	13 „Elastic WOODSCRAPER II“	
Konzept		<p><u>Bild 1</u> Darstellung des Prototyps</p>  <p>Weingartner Architects</p>
Planer	Architektur	Leonhard Weingartner Kohlgartenstrasse 56 04315 Leipzig www.weingartnerarchitects.com
Bauweise	Tragwerk	Stahlbetonkern sowie unterstützende Stahlstützen an zwei Außenseiten mit bis zu acht „Skyboxen“
	Gebäudehülle (Kern)	„Skyboxen“ aus einer Holz-Glas-Konstruktion
Sonstiges	<ul style="list-style-type: none"> – Hybridbaukonzept als neues Konzept im Bereich des mehrgeschossigen Holzbaus – Durch ein effizientes Blockheizkraftwerk, Solarpaneele und vertikale Windräder an den Stahlsäulen sollen sich die „Skyboxen“ energieautark betreiben lassen. – Decken, Trennwände, Böden und Schalungen werden in Holz ausgeführt, damit das Gebäude aus bis zu 70 % Holz besteht. 	
Quellen	<ul style="list-style-type: none"> – Architekt Dipl. Ing. Leonhard Weingartner / Weingartner Architects – Weingartner Architects (o.J.). <i>elastic_WOODSCRAPER II</i>. Abgerufen 06.08.2015 am von www.woodscrapper.org. – Reitberger, M. (2015). Gipfelstürmer. <i>Holzbauaustria</i>, 03/2015, S. 46–49. 	

4.2 Materialisierung und Detaillierung der Referenzprojekte

4.2.1 Auswahl der Referenzprojekte

Fünf der vorgestellten Projekte dienen als Datengrundlage für weiterführende Betrachtungen und für die Parameterstudie in Kapitel 5:

- Boyenstraße – 7-geschossiges Nullemissionshaus, Berlin
- CO₂-neutrale Grundschule, Hamburg
- LCT One, Dornbirn
- „Tor zur Welt“ Bildungszentrum, Hamburg
- WohnSinn 2, Darmstadt

4.2.2 Bauphysikalische Eigenschaften

Tabelle 4-2 zeigt die bauphysikalischen Eigenschaften – Wärme- und Feuchteschutz – der Fassadenelemente der Beispielprojekte. Die Werte wurden mit Hilfe des Online-Tools „u-wert.net“ stationär berechnet. Die hinterlegten wärmeschutztechnischen Bemessungswerte sind der Tabelle A1 (Anhang 1) zu entnehmen, die bauphysikalischen Grundlagen Kapitel 2.3. Die in der Praxis ausgeführten Materialien (Herstellerangaben) sind nicht detailliert bekannt. Deshalb sind die Werte als Anhaltspunkte zu sehen. Die DIN EN ISO 10456 weist in Kapitel 8.1 ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den Bemessungswerten um typische Werte handelt, die – sofern verfügbar – durch zertifizierte Werte der Hersteller ersetzt werden sollten. Im Fall des LCT One ist zunächst die zulässige Stofffeuchte für Holzwerkstoffplatten nach Tabelle 3 (zementgebundene Spanplatte) überschritten, es ist allerdings wahrscheinlich, dass sich die normtypischen Werte negativer auswirken, als die der ausgeführten Variante.

Tabelle 4-2: Bauphysikalische Eigenschaften der Fassadenelemente der Referenzprojekte basierend auf eigenen Berechnungen (Eigene Darstellung)

Projekt/ Bauteil	Fassade				
	U-Wert [W/m ² K]	Tauwasserausfall		Hitzeschutz	
		Kondensat [g/m ²]	Trocknungs- dauer [d]	Phasen- verschie- bung [h]	Temperatur- amplitudenver- hältnis TAV [-]
Boyenstraße – 7-geschossiges Nullemissionshaus/WDVS-Fassade	0,120	Ca. 740 Zulässige Stofffeuchte eingehalten	Ca. 30	Ca. 24	Ca. 0,005
CO₂-neutrale Grundschule	0,143	Ca. 0,0	-	Ca. 9,8	Ca. 0,043
LCT One	0,143	Ca. 820 Achtung spezifische Herstellerangaben und zulässige Holz- bzw. Stofffeuchte überprüfen	Ca. 50	Ca. 14	0,019
Tor zu Welt Bildungszentrum	0,123	Ca. 0,0	-	11	0,022
WohnSinn 2	0,123	Ca. 0,0	-	17	0,10

Aus obiger Tabelle wird die Anfälligkeit eines WDVS gegenüber dem Tauwasserausfall im Bauteilinneren deutlich. Bei der Fassade der Boyenstraße, welche mit einem WDVS ausgeführt wurde, fallen ca. 740 g/m² Tauwasser aus, beim Projekt LCT One 820 g/m². Diese Werte sind nur zulässig, insofern gewährleistet werden kann, dass die Tauwassermenge während der Tauperiode den kritischen, massenbezogenen Feuchtegehalt von Holz- und Holzwerkstoffen nicht überschreitet und in der Verdunstungsperiode wieder vollständig abtrocknet.

Tabelle 4-3: Berechnungsergebnisse zu den Wärmebrückendetails der Referenzprojekte (Eigene Darstellung)

Basisdetail	Oberflächentemperatur [°C]	f _{Rsi} [-]	ψ _e [W/mK]
Boyenstraße – 7-geschossiges Nullemissionshaus			
Anschluss Außenwand – Geschossdecke	Oben: 19,4 Unten: 18,7	Oben: 0,98 Unten: 0,95	0,053
CO₂-neutrale Grundschule			
Anschluss Außenwand – Geschossdecke	Oben: 18,6 Unten: 19,1	Oben: 0,94 Unten: 0,96	0,035
Anschluss Außenwand – Bodenplatte	17,7	0,91	-0,068
LCT One			
Anschluss Außenwand – Dach	18,2	0,93	-0,076
Anschluss Außenwand – Geschossdecke	Oben: 18,8 Unten: 19,2	Oben: 0,95 Unten: 0,96	0,027
Tor zu Welt Bildungszentrum			
Anschluss Außenwand - Geschossdecke	Oben: 19,1 Unten: 18,8	Oben: 0,96 Unten: 0,95	0,060
Anschluss Außenwand - Bodenplatte	17,7	0,91	-0,018
WohnSinn 2			
Anschluss Außenwand – Dach/First	18,5	0,94	-0,024
Anschluss Außenwand – Dach/Traufe	18,5	0,94	-0,022
Anschluss Außenwand - Geschossdecke	Oben: 18,9 Unten: 19,2	Oben: 0,96 Unten: 0,97	0,025
Anschluss Außenwand - Bodenplatte	18,4	0,94	-0,019

Die Ergebnisse aus Tabelle 4-3 bestätigen den hohen Dämmstandard aller Gebäudehüllen. Dabei wurden die Basisdetails Anschluss Dach-Außenwand, Außenwand-Geschossdecke und Außenwand-Bodenplatte näher betrachtet (siehe Kapitel 5.3). Die Außenwände erfüllen mit einem U-Wert ≤ 0,15 W/m²K beispielsweise alle die Passivhausanforderungen. Die Oberflächentemperaturen und die sich daraus ergebenden f_{Rsi}-Werte in den Anschlussbereichen liegen weit über den kritischen Werten von 12,6 °C bzw. f_{Rsi}= 0,70.

4.2.3 Materialisierung und Ökobilanz der Fassaden

Um die Unterschiede zwischen Außenwänden in Holzrahmenbauweise und konventionellen Außenwänden zu verdeutlichen, wurden zusätzlich zu den Beispielprojekten vier unterschiedliche Vergleichskonstruktionen bilanziert. Es handelt sich hierbei um zwei Ziegelwände (perlitegefüllt bzw. mit Wärmedämmverbundsystem), eine Betonwand mit WDVS und eine Aluminium-Vorhangfassade. Sämtliche Vergleichsfassaden haben einen U-Wert von ca. 0,15 W/m²K und sind damit in Bezug auf ihren Dämmwert etwas ungünstiger als die Holzrahmenbau-Elemente.

Alle Fassadenaufbauten und die Ergebnisse der Ökobilanz der Beispielprojekte können im Kapitel 5.6 detailliert nachgelesen werden.

Abbildung 4-2 zeigt das Gewicht der Außenwände im Vergleich zu konventionellen Fassaden aus Ziegel oder Stahlbeton. Hier zeigt sich deutlich, dass nur das Gewicht einer Aluminium-Vorhangfassade unter dem Gewicht einer Holzrahmenbauwand liegt. Massivbauteile sind um ein Vielfaches (zwei- bis über dreimal) schwerer. Das bedeutet unter anderem, dass die Holzfassaden das Potenzial bieten, den Transportaufwand vom Hersteller zur Baustelle zu verringern, ebenso wie den Aufwand für Demontage und Transport beim späteren Rückbau.

Zusätzlich wird der Gewichts-Anteil an Holz und Holzwerkstoffen gezeigt. Dieser beträgt bei den untersuchten Holzrahmenbau-Fassaden zwischen 27% und 45%. Selbst bei diesen Fassaden machen also andere Baustoffe (mineralische Dämmstoffe, Fassadenbekleidungen, Innenbekleidungen, etc.) mehr als die Hälfte des Gewichtsanteils aus, da Holz im Vergleich zu mineralischen Baustoffen eine wesentlich geringere Rohdichte aufweist.

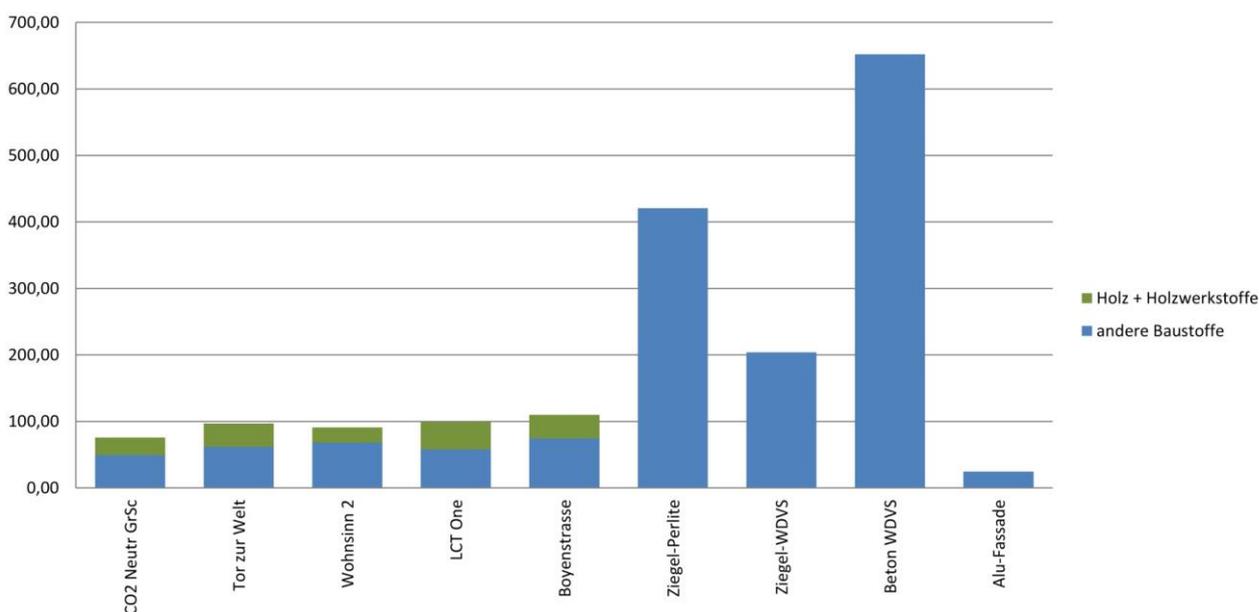


Abbildung 4-2: Gewicht und Holzanteil der Außenwände der Referenzprojekte und Vergleichsfassaden (Eigene Darstellung)

Die Fassaden wurden für die Lebenszyklusphasen Herstellung und Entsorgung auf der Grundlage der Ökobaudat 2011 mit Hilfe des vom BBSR entwickelten Werkzeugs eLCA (www.bauteileditor.de) ökobilanziert. Die verwendeten Datensätze sind in Tabelle A3 (Anhang 2) nachzulesen. Die Tabelle 4-4 zeigt die

Ergebnisse für den Primärenergieinhalt und das Treibhauspotenzial der Außenwände, jeweils pro m² Außenwandfläche. Zunächst fällt auf, dass nur für die Fassadensysteme mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) ein Instandhaltungsaufwand bilanziert ist. Die Lebensdauer dieses Bauteils wird derzeit mit 40 Jahren angenommen, d.h. über einen Bilanzierungszeitraum von 50 Jahren wird das WDVS einmal erneuert. Farbanstriche auf der Innenwand wurden nicht bilanziert, aus diesem Grund erscheint für kein System dafür ein Instandhaltungsaufwand.

Tabelle 4-4: Berechnungsergebnisse Primärenergie und Treibhauspotenzial der Referenzprojekte und der Vergleichsfassaden pro m² Außenwandfläche (Eigene Darstellung)

Außenwand	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ -Äqv.]
Boyenstrasse			
Herstellung	825,91	914,42	-35,02
Entsorgung	-978,31	-22,68	34,24
Instandhaltung	178,97	210,39	13,53
Gesamt	26,57	1102,10	12,74
CO2-neutrale Grundschule			
Herstellung	828,21	843,21	-9,70
Entsorgung	-550,35	-22,91	29,96
Instandhaltung	0,00	0,00	0,00
Gesamt	277,86	820,30	20,26
LCT One			
Herstellung	817,59	1074,90	-34,50
Entsorgung	-807,73	-33,99	48,98
Instandhaltung	0,00	0,00	0,00
Gesamt	9,87	1040,90	14,48
Tor zur Welt			
Herstellung	698,35	707,04	-20,96
Entsorgung	-417,54	-31,88	37,79
Instandhaltung	0,00	0,00	0,00
Gesamt	280,81	675,16	16,83
Wohnsinn 2			
Herstellung	592,77	553,90	-22,99
Entsorgung	-701,45	-19,59	25,47
Instandhaltung	0,00	0,00	0,00
Gesamt	-108,68	534,31	2,47
WA_Ziegel-Perlite			
Herstellung	1034,60	174,10	73,41
Entsorgung	22,49	0,90	1,14
Instandhaltung	0,00	0,00	0,00
Gesamt	1057,10	175,00	74,55

Fortsetzung Tabelle 4-4:

WA_Ziegel-WDVS			
Herstellung	563,36	60,62	46,42
Entsorgung	14,69	0,77	1,07
Instandhaltung	272,35	16,62	22,61
Gesamt	850,40	78,00	70,11
StB mit WDVS			
Herstellung	874,95	54,77	97,49
Entsorgung	37,34	1,68	2,23
Instandhaltung	289,83	17,60	24,09
Gesamt	1202,10	74,05	123,81
Alu-Vorhangfassade			
Herstellung	3377,30	713,77	228,92
Entsorgung	-2073,20	-519,11	-136,92
Instandhaltung	0,00	0,00	0,00
Gesamt	1304,10	194,66	92,00

4.2.3.1 Nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt

Weitere auffällige Unterschiede in den Ergebnissen der Lebenszyklus-Betrachtung werden im Folgenden untersucht. Abbildung 4-3 zeigt den **nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt** im Vergleich. Hierbei ist festzustellen, dass im Gesamtbild die mineralischen Außenwände und die Aluminium-Vorhangfassade einen um ein Vielfaches höheren Primärenergieinhalt aufweisen als die Holzrahmenbau-Wände. Die Ziegelwand mit WDVS benötigt 3,77-mal so viel nicht erneuerbare Primärenergie über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wie die Holzrahmenbaufassade des „Tor zur Welt“. Der Primärenergieinhalt der Projekte Boyenstrasse und LCT One ist auffallend gering, während die Außenwand von „Wohnsinn2“ gar eine Gutschrift für erneuerbare Primärenergie erhält. Diese Tatsache ist direkt verbunden mit den Entsorgungsszenarien der einzelnen Außenwände. Die Tatsache, dass die Außenwände der CO₂-neutralen Grundschule und LCT One einen geringfügig schlechteren U-Wert (0,14 W/m²K) im Vergleich zu den drei anderen Holzrahmenbau-Fassaden (0,123 W/m²K) aufweisen, spiegelt sich nicht in den Ergebnissen wider. Daraus lässt sich folgern, dass für die ökologischen Kennzahlen weniger die Dämmstoffstärke als vielmehr die Materialwahl ausschlaggebend ist.

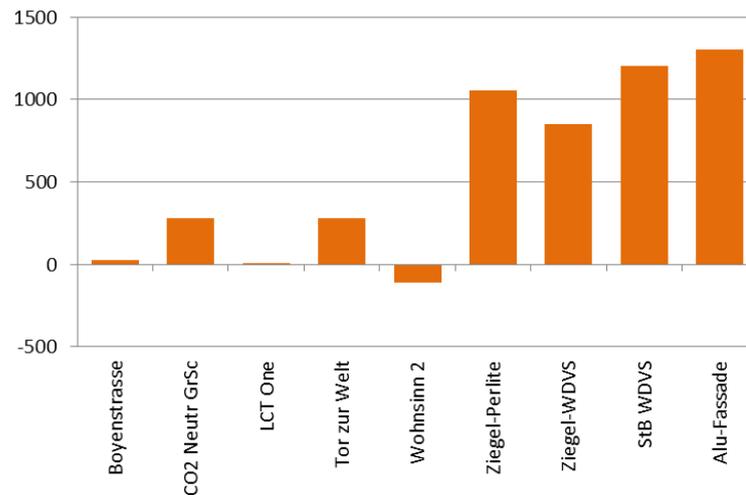


Abbildung 4-3: Vergleich nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt Außenwandelemente der Referenzprojekte und Vergleichs-Außenwände (in MJ pro m² Wandfläche) (Eigene Darstellung)

Um dies näher zu erläutern, ist der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf in *Abbildung 4-4* zusätzlich nach Lebenszyklus-Phasen gegliedert dargestellt. Die mit Abstand höchste Gutschrift für nicht erneuerbare Primärenergie erhält die Aluminium-Fassade. Aluminium wird in der Herstellung ein sehr hoher Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie zugeschrieben, da die Verwendung von Rohaluminium angenommen wird. Im Recyclingszenario wird dem zu recycelnden Aluminium die Energie gutgeschrieben, die durch den Ersatz des Rohaluminiums durch recyceltes Aluminium eingespart wird. Es besteht also hier ein direkter Zusammenhang zwischen dem Aufwand in der Herstellung und der Gutschrift für das Recycling: Je energieintensiver die Herstellung eines Materials ist, desto höher sind die potenziellen Einsparungen durch Recycling.

Etwas anders verhält es sich in Bezug auf die Holzrahmenbau-Fassaden: Für die Herstellung dieser Fassaden ist laut Ökobaudat 2011 der Aufwand an nicht erneuerbarer Primärenergie vergleichbar zur Herstellungenergie für die mineralischen Außenwände, also beispielsweise das Brennen von Ziegeln oder die Herstellung von Zement. In der Entsorgung allerdings werden alle brennbaren Baustoffe, zum Beispiel Konstruktionsvollholz, Zellulose-Einblasdämmung, Holzwerkstoffe, als (erneuerbare) Energieträger für die Strom- und Heizwärmegewinnung angerechnet. Da diese erneuerbaren Energieträger die derzeit noch weit verbreiteten nicht erneuerbaren Energieträger „verdrängen“, wird die gewonnene Energie zu dem Teil als nicht erneuerbar gutgeschrieben, der im derzeitigen Energiemix nicht erneuerbar erzeugt wird. Wenn in Zukunft immer mehr Energie aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird, werden diese Gutschriften proportional zum nicht erneuerbaren Anteil im Energiemix sinken. Ziegel und Stahlbeton dagegen werden zwar als Bauschutt aufbereitet, erhalten dafür aber keine Energiegutschriften.

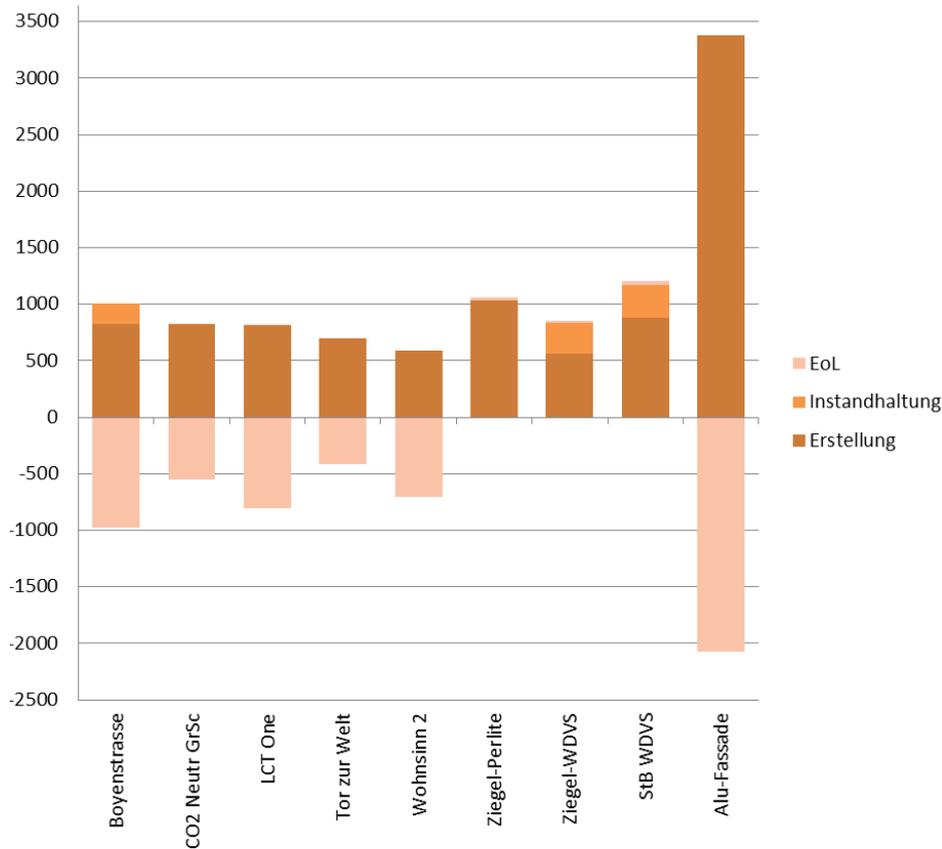


Abbildung 4-4: Vergleich nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt Außenwandelemente der Referenzprojekte und Vergleichs-Außenwände nach Lebenszyklusphasen (in MJ pro m² Wandfläche) (Eigene Darstellung)

4.2.3.2 Erneuerbarer Primärenergieinhalt

Die Betrachtung des **erneuerbaren Primärenergieinhalts** (Abbildung 4-5) zeigt, dass sich dieser umgekehrt verhält: Die Holzrahmenbaufassaden enthalten sehr viel mehr erneuerbare Primärenergie als die Vergleichsfassaden. Die Außenwand von „Wohnsinn2“ benötigt beispielsweise 3-mal so viel erneuerbare Primärenergie wie die perlitegefüllte Ziegelfassade. Diese Werte ergeben sich aus der Bilanzierung von nachwachsenden Rohstoffen: Ihnen wird die erneuerbare Primärenergie angerechnet, die sie in Form von Sonnenlicht im Wachstum aufnehmen. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 4-5 der Anteil an nicht erneuerbarer Primärenergie ausgewiesen, der im Holz gespeichert ist und als Heizwert zur Verfügung steht.

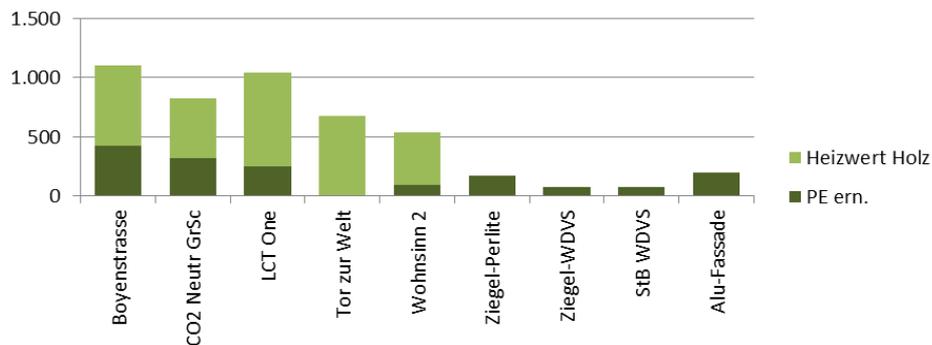


Abbildung 4-5: Vergleich erneuerbarer Primärenergieinhalt Außenwandelemente der Referenzprojekte und Vergleichs-Außenwände (in MJ pro m² Wandfläche) (Eigene Darstellung)

4.2.3.3 Treibhauspotential

Die Umwelt-Wirkungskategorie, die derzeit am stärksten in der öffentlichen Diskussion präsent ist, ist das **Treibhauspotential**. Die Ergebnisse der Ökobilanz der Außenwände hierfür werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet. Zunächst ergibt sich hinsichtlich des Vergleichs ein ähnliches Bild (Abbildung 4-6) wie für den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt, da bei der Umwandlung von nicht erneuerbaren Quellen in nutzbare Energie Treibhausgase freigesetzt werden: Die mineralischen Außenwände und die Aluminium-Vorhangsfassade verursachen mindestens 3,5-mal so viel Treibhauspotential über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wie die Holzrahmenbau-Außenwände.

Verschiebungen innerhalb der Außenwand-Gruppen sind auf Herstellungsprozesse, beispielsweise die Zementherstellung, bei der direkte CO₂-Emissionen anfallen, zurückzuführen, so dass aus dem nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt nie direkt auf das Treibhauspotential geschlossen werden darf, sondern nur Abschätzungen für Tendenzen möglich sind. Zum Beispiel wäre die Aussage richtig: „Mineralische Fassaden verursachen mehr Treibhauspotential als Holzrahmenbaufassaden, da für ihre Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung mehr nicht erneuerbare Energie benötigt wird“. Es kann aber nicht behauptet werden, dass die Stahlbetonfassade das höchste Treibhauspotential verursacht, weil sie den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt besäße. Eine rein energetische Betrachtung reicht also nicht aus, sondern eine separate Betrachtung des Treibhauspotenzials ist unabdinglich, wenn es als Umweltwirkungs-Kategorie mit einbezogen werden soll.

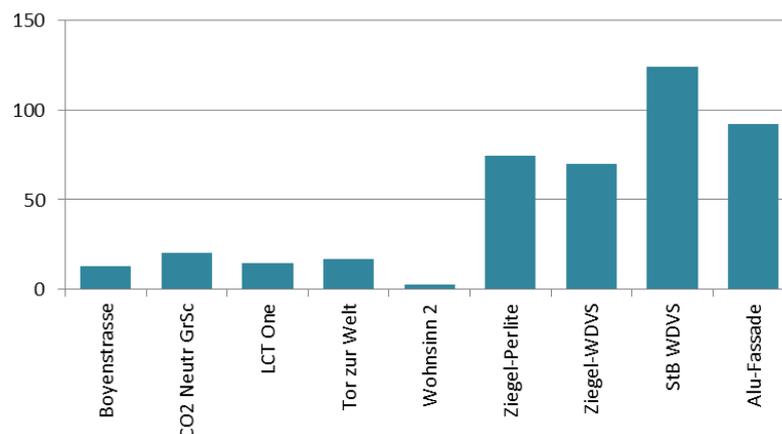


Abbildung 4-6: Vergleich Treibhauspotential Außenwandelemente der Referenzprojekte und Vergleichs-Außenwände (in kg CO₂-Äquivalent pro m² Wandfläche) (Eigene Darstellung)

Ein weiteres Indiz hierfür bietet die Analyse des Treibhauspotenzials nach Lebenszyklusphasen (Abbildung 4-7). Im Fall der Aluminium-Vorhangsfassade verhalten sich nicht erneuerbare Primärenergie und Treibhauspotential parallel: Es sind hohe Lasten im Herstellungsprozess und entsprechend hohe Gutschriften für das Recycling vorhanden. Für die Holzrahmenbau-Elemente sind die Zahlen für diese Indikatoren genau gegenläufig: Holz benötigt nicht erneuerbare Primärenergie in der Herstellung (positiver Wert für PE n. ern.) und erhält Gutschriften (negativer Wert für PE n. ern.) im End of Life-Szenario (Energiegewinnung aus Verbrennung). Gleichzeitig absorbiert Holz CO₂ in der Herstellung (Photosynthese), das bei der Verbrennung wieder emittiert wird, d.h. es besitzt in der Herstellung ein negatives (Gutschrift) und in der Entsorgung ein positives Treibhauspotential (Emissionen). Ein insgesamt negatives Treibhauspotential wäre möglich, da auch hier für die Verdrängung von Energiegewinnung mit hohem

Treibhauspotenzial CO₂-Gutschriften erfolgen, die von den CO₂-Emissionen aus der Holzverbrennung abgezogen werden.

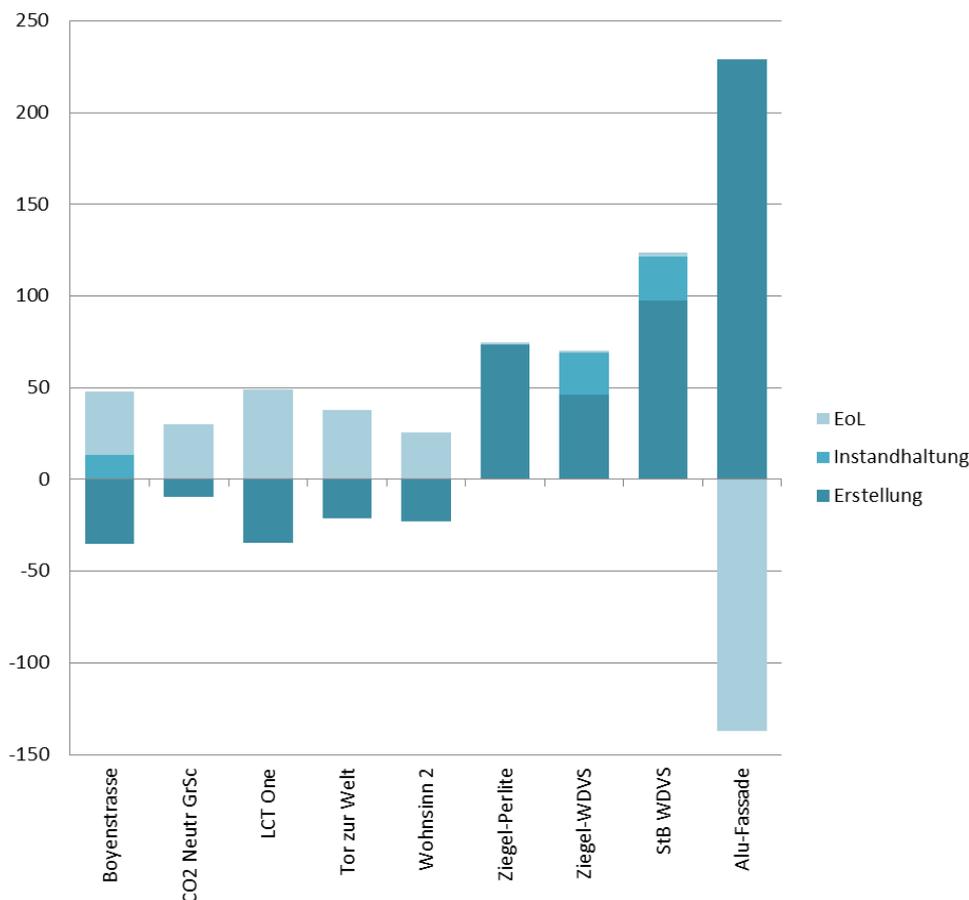


Abbildung 4-7: Vergleich Treibhauspotenzial Außenwandelemente der Referenzprojekte und Vergleichs-Außenwände nach Lebenszyklusphasen (in kg CO₂-Äquivalent pro m² Wandfläche (Eigene Darstellung)

4.2.3.4 Weitere Umweltwirkungen

In einer vollständigen Ökobilanz werden außer Treibhauspotenzial weitere Umwelt-Wirkungen analysiert, wie in Kapitel 2.12.1.2 näher erläutert. Da diese Umweltwirkungen in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, ist auch die Größenordnung der Ergebnisse sehr unterschiedlich. Um diese Umweltwirkungen dennoch verständlich in einer Grafik darzustellen, werden die Ergebnisse folgendermaßen in Prozentzahlen umgerechnet: Der höchste Wert einer Kategorie stellt 100% der Wirkung dar, alle anderen Werte werden in Abhängigkeit von diesem Wert gezeigt. Verursacht beispielsweise eine Holzrahmenbau-Fassade ein Überdüngungspotenzial (EP) von 0,0328 kg Phosphat-Äquivalent (kg PO₄-Äquiv.) und die Stahlbetonfassade mit WDVS ein EP von 0,0467 kg PO₄-Äquiv. werden 70% bzw. 100% grafisch dargestellt. In *Abbildung 4-8* sind die derzeit üblichen Umweltwirkungskategorien auf diese Weise repräsentiert. Hier zeigt sich, dass in drei von vier Kategorien die Stahlbetonwand mit WDVS die höchsten Umweltwirkungen verursacht, während die Holzrahmenbau-Fassaden um mindestens 30% niedriger liegen: Die Außenwand der Boyenstrasse liegt bei 70% des Überdüngungspotenzials der StB-Wand, Wohnsinn 2 bei 17% des Versauerungspotenzials. Beim Ozonabbaupotenzial schneidet die Aluminiumfassade am schlechtesten ab. Hier bewegen sich zwei Prozentsätze der Holzrahmenbaufassaden sogar im negativen Bereich, da hier Gutschriften für End-of-Life-Prozesse berechnet wurden.

An dieser Betrachtung zeigt sich gleichzeitig ein typisches Phänomen von Ökobilanzen: Je mehr Wirkungskategorien betrachtet werden, desto weniger eindeutig ist das Ergebnis. Bezieht man in die obige Betrachtung auch die Ziegelfassaden mit ein, finden sich Wirkungskategorien, für die eine Ziegelfassade besser abschneiden würde als eine Holzrahmenbaufassade. Das Ozonabbaupotenzial (ODP= Ozone Depletion Potential) einer Ziegelfassade mit WDVS beispielsweise ist niedriger als das ODP von drei der fünf Holzrahmenbaufassaden, ebenso wie das Ozonbildungspotenzial (POCP=Photochemical Ozone Creation Potential) einer perlitegefüllten Ziegelfassade etc. In den Wirkungskategorien Versauerungspotenzial (AP=Acidification Potential) und Überdüngungspotenzial (EP) schneidet die Aluminium-Fassade günstiger ab als vier der fünf Holzrahmenbaufassaden. Auffällig ist, dass die Fassade des Projektes „Wohnsinn 2“ in allen Kategorien am besten abschneidet. Dies liegt zum einen daran, dass hier keine Installationsebene verwendet ist, zum anderen aber an der Verwendung von Zellulose als Dämmstoff, die ökobilanziell sehr günstig bewertet wird.

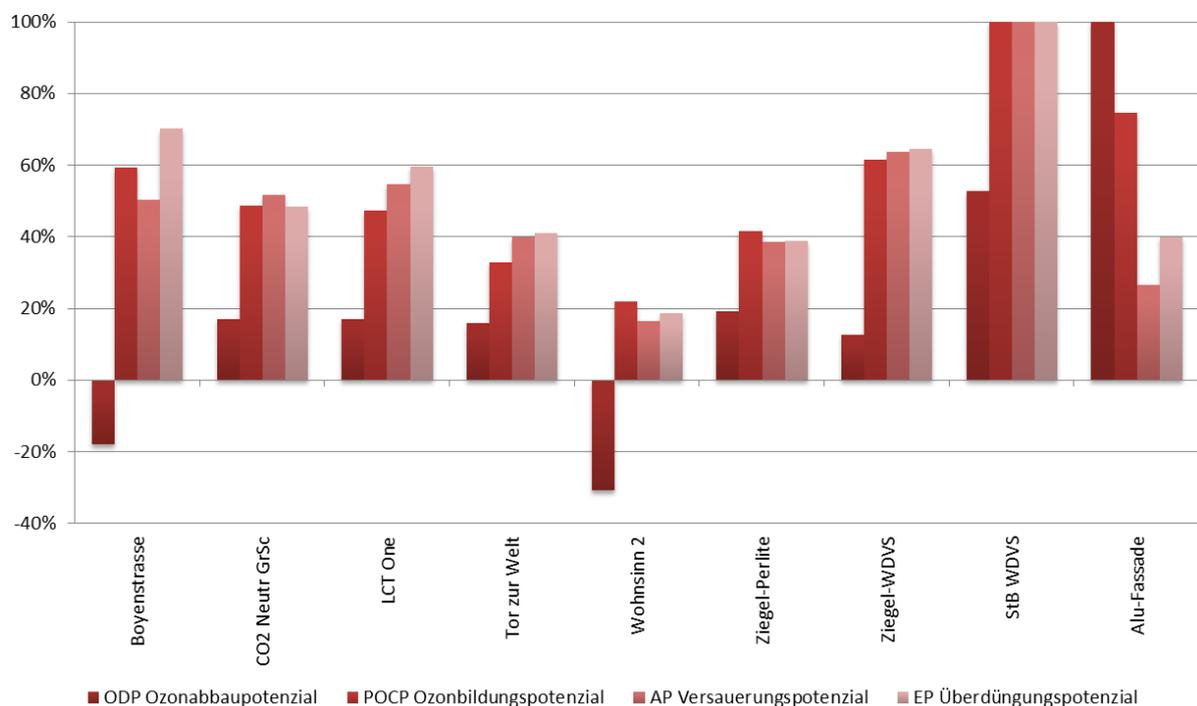


Abbildung 4-8: Vergleich Umweltwirkungspotenziale Außenwandelemente der Referenzprojekte und Vergleichs-Außenwände nach Lebenszyklusphasen (in Prozent) (Eigene Darstellung)

Es muss also immer das Gesamtbild der ökologischen Analyse mit einbezogen werden, um die Qualität von Bauteilen gegeneinander abwägen zu können. Umwelt-Wirkungskategorien können gewichtet oder zusammengefasst werden, um eine Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Dabei sollte dennoch nicht außer Acht gelassen werden, dass solche Gewichtungen immer bis zu einem gewissen Grad subjektiv bleiben, da es uns nicht möglich ist, die langfristigen Wirkungen auf die Umwelt exakt zu bestimmen. Allerdings können wie im vorliegenden Fall Tendenzen festgestellt und ggf. große negative Wirkungen vermieden werden, wenn vornehmlich nur wenige Werte (zum Beispiel wie in unserem Fall Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial) zu Rate gezogen werden und die Ergebnisse anderer Wirkungskategorien als Kontrollgröße mit einbezogen werden.

4.2.3.5 Vergleich Ökobaudat 2011 und 2015

Für die gezeigten Berechnungen wurde die Ökobaudat 2011 verwendet, da sie zum Bearbeitungszeitpunkt des Projektes sowohl als Grundlage für das DGNB-Zertifizierungssystem als auch für die in Deutschland auf dem Markt befindlichen computergestützten Werkzeuge zur Ökobilanzberechnung im Gebrauch ist. Wie im Kapitel 2.5 erläutert, ändert sich die Berechnung einer Gebäude-Ökobilanz dahingehend, dass die Lebenszyklus-Phasen klarer abgegrenzt sind. Besonders im End-of-Life-Szenario müssen Gutschriften nun separat ausgewiesen werden (Model D) (PE International, 2013). Die Ökobaudat 2015 wurde am 20.08.2015 veröffentlicht. Im Folgenden werden am Beispiel der Außenwand des Projektes Tor zur Welt die Veränderungen in der Berechnung und im Ergebnis dargestellt.

Die Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 zeigen die jeweils verwendeten Datensätze. Für die Herstellung zeigt sich, dass zwei Datensätze nicht mehr in der Ökobaudat 2015 vorhanden sind und daher ersetzt wurden. Für Gipskartonplatten stand nur ein herstellerspezifischer Datensatz zur Verfügung, für die Fermacell-Platte wurde in Ermangelung eines vergleichbaren Datensatzes eine Umweltproduktdeklaration herangezogen. Die Ergebniswerte wurden analog zu den für die Ökobaudat geltenden Regeln mit 10% Sicherheitszuschlag beaufschlagt (PE International, 2013).

Tabelle 4-5: Legende für Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 (Eigene Darstellung)

Legende
Fassade
Kernelement
Befestigung
Innerer Abschluss

Tabelle 4-6: Gegenüberstellung verwendete Datensätze Herstellung Ökobaudat 2011 und Ökobaudat 2015 (Änderungen blau markiert) (Eigene Darstellung)

Tor zur Welt – Herstellung			
Baustoff	Schichtdicke	Ökodaten Herstellung	Ökodaten (A1-A3)
	[mm]	Ökobaudat 2011	Ökobaudat 2015
Stülpchalung	25	3.1.01 Schnittholz Lärche (12% Feuchte/10,7% H2O)	3.1.01 Schnittholz Lärche (12% Feuchte/10,7% H2O) (de)
Traglattung	35	3.1.02 Konstruktionsvollholz	3.1.02 Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de)[A1-A3]
Zementgeb., glasfaserbewehrte Sandwichplatte (Z-31.1-176)	15	1.3.04 Leichtbetonelemente - BV Leichtbeton	EPD-FMC-2012211-D (Fermacell Powerpanel)
Konstruktionsvollholz	260	3.1.02 Konstruktionsvollholz	3.1.02 Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de)[A1-A3]
Mineralwolle	260	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung) (de)
PE-Folie	0,2	6.6.02 Dampfbremse PE	6.6.02 Dampfbremse PE (de)
GF-Platte	15	1.3.13 Gipsfaserplatte	1.3.13 Gipsfaserplatte (de)

Fortsetzung Tabelle 4-6:

Stahlwinkel			4.1.03 Stahlprofil
Konstruktionsvollholz	75	3.1.02 Konstruktionsvollholz	3.1.02 Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de)[A1-A3]
Mineralwolle	75	2.1.01 Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)	2.1.01 Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung) (de)
Gipskarton-Platte	2x 12,5	1.3.13 Gipskartonplatte	1.3.13 Knauf - Gipskartonplatten GKB

Im Falle der End-of-Life-Datensätze ist zu sehen, dass für einige Materialien, die in der Ökobaudat 2011 noch mit pauschalen Szenarien berechnet wurden, nun materialspezifische Datensätze zur Verfügung stehen. Hierzu ist anzumerken, dass für Konstruktionsvollholz neben der thermischen Verwertung als Alternative auch ein Recycling-Szenario (stoffliche Verwertung) zur Verfügung steht. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit wurde für die vorliegende Berechnung die thermische Verwertung angenommen.

Außerdem haben sich zum Teil die deklarierten Einheiten und die angegebenen Rohdichten geändert. Wog Konstruktionsvollholz laut Ökobaudat 2011 noch 529 kg/m³, wiegt es laut Ökobaudat 2015 nur rund 493 kg/m³. Daraus folgt zum einen ein niedrigeres berechnetes Gesamtgewicht der Fassade, so dass etwas weniger Stahl-Befestigungswinkel nötig sind. Zum anderen ergeben sich unterschiedliche Massen für die Verwertung bzw. Entsorgung.

Tabelle 4-7: Gegenüberstellung verwendete Datensätze End of Life Ökobaudat 2011 und Ökobaudat 2015 (Änderungen blau markiert) (Eigene Darstellung)

Tor zur Welt - End of Life				
Baustoff	Menge	Ökodaten Entsorgung	Menge	Ökodaten EoL inkl. Gutschrift (C3-C4+D)
	kg	Ökobaudat 2011	kg	Ökobaudat 2015
Stülpchalung	16,52	3.4.03 End of life - Holz naturbelassen in MVA	16,52	3.4.03 End of life - Holz naturbelassen in MVA (de) [C3+D]
Traglattung	1,48	3.4.03 End of life - Holz naturbelassen in MVA	1,38	3.1.02 Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de) [C3+D]
Zementgeb., glasfaserbewehrte Sandwichplatte (Z-31.1-176)	13,50	9.5.01 Bauschutt-aufbereitung	14,30	9.5.01 Bauschutt-aufbereitung (de) [C3]
Konstruktionsvollholz	13,20	3.4.03 End of life - Holz naturbelassen in MVA	12,30	3.1.02 Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de) [C3+D]
Mineralwolle	10,87	9.5.02 Bauschutt-Deponierung	10,87	9.5.02 Bauschutt-Deponierung (de) [C4]
PE-Folie	0,20	6.8.01 Verbrennung Kunststoff in MVA incl. Gutschrift	0,20	6.8.01 Verbrennung Kunststoff in MVA incl. Gutschrift (de) [C4+D]
GF-Platte	15,00	9.5.01 Bauschutt-aufbereitung	15,00	9.5.01 Bauschutt-aufbereitung (de) [C3]
Stahlwinkel	0,28	4.8.09 Recyclingpotential Stahlprofil	0,27	4.1.03 Stahlprofil (de) [C3+D]

Fortsetzung Tabelle 4-7:

Konstruktionsvollholz	3,81	3.4.03 End of life - Holz naturbelassen in MVA	3,55	3.1.02 Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) (de) [C3+D]
Mineralwolledämmung	1,78	9.5.02 Bauschutt-Deponierung	1,78	9.5.02 Bauschutt-Deponierung (de) [C4]
Gipskarton-Platte	20,00	9.5.01 Bauschuttzubereitung	17,00	1.3.13 Knauf - Gipskartonplatten GKB [C4]

Die Berechnung in *Abbildung 4-9* und *Abbildung 4-10* zeigt, dass die Ergebnisse der Ökobilanz für alle Indikatoren, zum Teil auch sehr stark voneinander abweichen. Insgesamt variieren auch die Tendenzen, d.h. je nach Kategorie steigen oder sinken die Werte. Dies ist allerdings nicht auf einen einzelnen Datensatz zurückzuführen, sondern ergibt sich aus der Gesamtwirkung der einzelnen Datensätze und den oben beschriebenen Abweichungen in den Massen, so dass bei unterschiedlichen Kategorien in den entsprechenden Lebenszyklusphasen jeweils unterschiedliche Datensätze als die größten Verursacher von Veränderungen identifiziert werden können. Es ergibt sich kein einheitliches Bild. Im Folgenden sind exemplarisch die Ergebnisse für erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie und Treibhauspotenzial analysiert.

Für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf sinken die Werte insgesamt, während sie für Treibhauspotenzial und erneuerbare Primärenergie steigen.

Auffällig beim Treibhauspotenzial ist die Tatsache, dass die CO₂-Gutschriften für die Herstellungsphase in der Berechnung nach ÖkobaDat 2015 um 70% geringer sind als nach ÖkobaDat 2011. Die Hauptursache für diese Veränderung findet sich im zugrundeliegenden Datensatz für die zementgebundene glasfaserbewehrte Sandwichplatte. Da hier zwei unterschiedliche Datensätze (s. Tabelle 4-6) verwendet wurden, ist dies nicht überraschend. Es zeigt sich dabei, dass sich ein von der Masse her vergleichbar untergeordnetes Material durchaus auf Ergebnisse auswirken kann. Für die Verwertung bzw. Entsorgung werden um 9% geringere CO₂-Emissionen nach ÖkobaDat 2015 veranschlagt als nach ÖkobaDat 2011. Dies kann zum Großteil auf die neuen Datensätze für Konstruktionsvollholz zurückverfolgt werden. Insgesamt wird die geringere Gutschrift aus der Herstellungsphase dadurch nur zu einem kleinen Teil kompensiert, so dass in der Summe eine Abweichung von 67% entsteht.

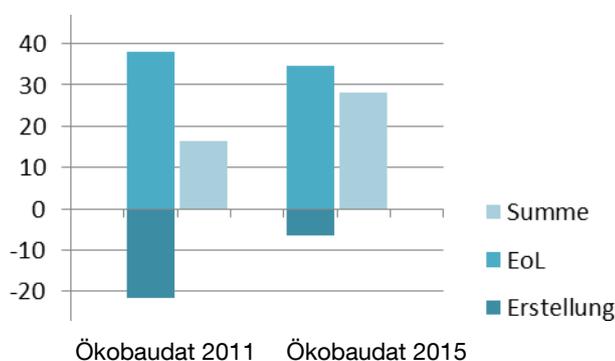


Abbildung 4-9: Vergleich der Ergebnisse für das Treibhauspotenzial der Außenwand „Tor zur Welt“ in kg CO₂-Äquiv. pro m² Wandfläche (Eigene Darstellung)

Vergleicht man die Werte für die nicht erneuerbare Primärenergie (Abbildung 4-10, links), zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Ökobaudat 2011 und 2015 in der End of Life Phase. Hier erhält die Außenwand um 2% höhere Gutschriften nach Ökobaudat 2015. In der Erstellung benötigt sie um ca. 5% weniger nicht erneuerbare Primärenergie. Insgesamt ergibt sich ein um 16% geringerer nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf nach Ökobaudat 2015. Diese Veränderungen sind fast ausschließlich auf die neuen Werte für Holz in der Ökobaudat 2015 zurückzuführen.

Bezüglich der erneuerbaren Primärenergie sind die Veränderungen größer, wie in Abbildung 4-10 (rechts) zu erkennen. Die Herstellung der Außenwand benötigt nach Ökobaudat 2015 48% mehr erneuerbare Primärenergie als nach Ökobaudat 2011. Im End of Life Szenario erhält sie zwar um 9% höhere Gutschriften, in der Summe erhöht sich der Primärenergiebedarf allerdings um fast 50%. Auch hier spielen die Daten für Holz eine entscheidende Rolle, zusammen mit den Daten der Gipskartonplatte und der zementgebundenen glasfaserbewehrten Sandwichplatte.

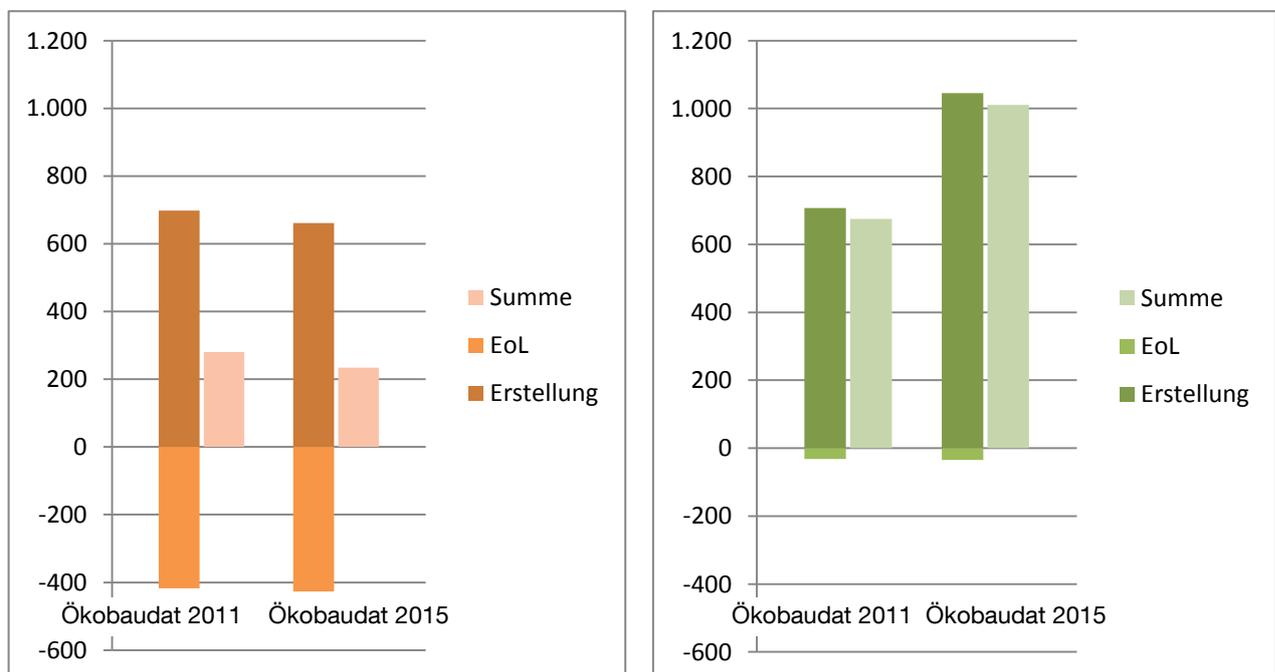


Abbildung 4-10: Vergleich der Ergebnisse für Primärenergie nicht erneuerbar (links) und erneuerbar (rechts) der Außenwand „Tor zur Welt“ (in MJ pro m² Wandfläche) (Eigene Darstellung)

Der Vergleich der Ergebnisse aus Ökobaudat 2011 und 2015 zeigt, dass eine Ökobilanzstudie nur bei Verwendung identischer Datenbanken für alle Berechnungen einen gesicherten Vergleich möglich macht. Aus dem Vergleich für einen einzelnen Wandaufbau mit hohem Holzanteil lässt sich schließen, dass die neuen Datensätze für Holz in der Ökobaudat 2015 eine Senkung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs zeigen bei gleichzeitig steigendem erneuerbaren Primärenergiebedarf. Eine eindeutige Tendenz für das Treibhauspotenzial lässt sich hingegen nicht feststellen.

4.2.3.6 Konstruktive Verbindungsmittel

Als konstruktive Verbindungsmittel wurden die Befestigungswinkel der Holzrahmenbau-Fassaden an die Stahlbetondecken mitbilanziert. Die Stahlmassen ergeben sich aus einer Vorbemessung (siehe Kapitel 5.1.2). Die Größe der Winkel ist abhängig vom Gewicht des Fassadenelements und wurde auf den Quadratmeter Fassade bezogen nach der Formel

$$0,365 \text{ kg Stahlwinkel pro } 120 \text{ kg Fassadengewicht}$$

abgeschätzt. Daraus ergeben sich Stahlmassen zwischen 0,22 kg und 0,31 kg pro m² Holzelementfassade.

In der Ökobilanz wurde festgestellt, dass sich die Stahlwinkel nur geringfügig auf die Gesamtbilanz auswirken. Ihr Anteil beträgt am Treibhauspotenzial maximal 2,55%, an der nicht erneuerbaren Primärenergie maximal 3,93% und an der erneuerbaren Primärenergie maximal 0,05%.

5 Parameterstudien

Im Rahmen der folgenden Parameterstudie werden Varianten von Ausführungsweisen behandelt, die für zukünftige Projekte als sinnvoll erachtet wurden. Die Varianten ergeben sich aus der Auswertung der Projektbeispiele, der Abstimmung mit Planern und Unternehmen der Bauindustrie sowie der projektbegleitenden Arbeitsgruppe. Die Ergebnisse können als Grundlage für die frühen Phasen der Planung genutzt werden, um eine relativ genaue Einschätzung von statischen, bauphysikalischen und ökologischen Faktoren zu erhalten.

5.1 Tragwerke und Verbindungen

5.1.1 Simulationsrechnungen Tragwerk

In Simulationsrechnungen wurden die Verformungen eines End- sowie eines Innenfelds eines Deckensystems mithilfe der Finiten-Element-Methode untersucht um das Verformungsverhalten unter gewissen Randbedingungen zu prognostizieren. Dies soll vor allem die Planungssicherheit bei der Schnittstelle zwischen Stahlbetontragwerk und Fassade verbessern. Anhand von Bauteilversuchen, welche unter Kapitel 6.1.2 näher vorgestellt werden, wurden die numerischen Simulationen verifiziert. Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich zwischen Versuchsergebnissen der Platte P1 sowie zugehörigen Finite-Element-Simulation als Versuchsnachrechnung. In der Arbeitslinie des Versuchs ist die Belastungshistorie von 70 Tagen berücksichtigt. Die FEM-Simulation wurde für einen Zeitpunkt von $t \rightarrow \infty$ mit Baustoffeigenschaften gemäß DIN EN 1992-1-1 (DIN EN 1992-1-1, 2013) für den Beton C25/30 und Betonstahl B500 durchgeführt. Daher sind die ermittelten Verformungen größer als in den Versuchen. Mit der vorliegenden Berechnungsmethode konnte der ohnehin klein ausgebildete Zustand I kaum nachvollzogen werden, da die Zugfestigkeiten die gemäß DIN EN 1992-1-1 zugelassen werden als konservativ zu betrachten sind. Überfestigkeiten bei dem Versuchskörper verstärken diese Diskrepanz. Dennoch ist die Steigung der Last-Verdrehungskurven sehr ähnlich, wodurch die Ergebnisse der nicht linearen Berechnungen als plausibel betrachtet werden können. Die Verformungsberechnungen liegen auf der sicheren Seite.

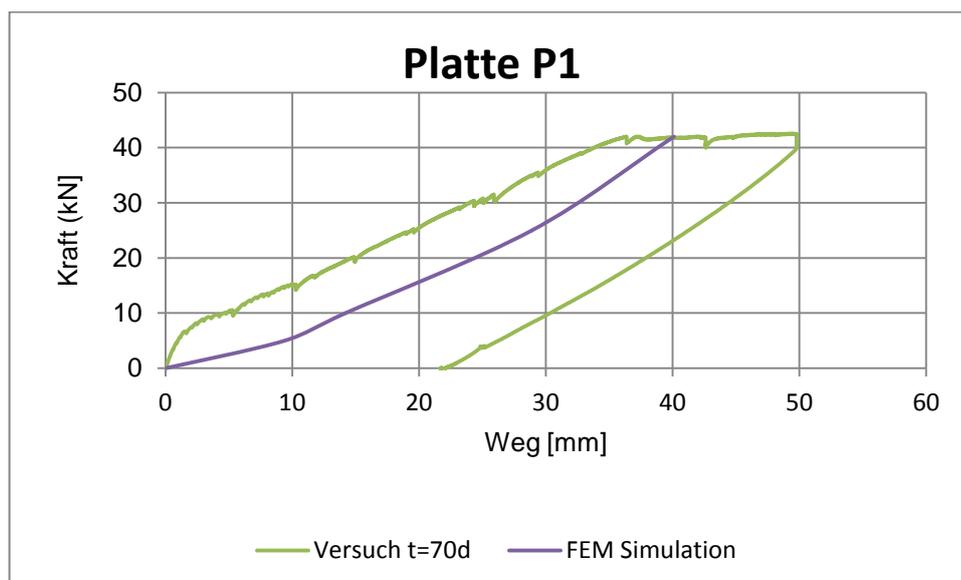


Abbildung 5-1: Kraft-Weg-Diagramm; Versuch vs. FEM Simulation (Eigene Darstellung)

5.1.1.1 Stahlbetonbauweise

Zunächst wurde die konventionelle Stahlbetonbauweise untersucht. Deckenplatten mit freiem Rand sowie mit Randunterzug wurden modelliert. Die Umsetzung wurde mit dem Programm SOFiSTiK 2014 realisiert. Es erfolgte eine nicht lineare Analyse im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit der entsprechenden Lastfallkombination und Baustoffeigenschaften. In einer Vorlaufrechnung wurde die statisch erforderliche Bewehrung ermittelt und im Anschluss in praxisüblichen Verlegeabständen vorgegeben. Kriech- und Schwindbeiwerte wurden entsprechend der jeweiligen Situation ermittelt. Die mitwirkende Plattenbreite b_{eff} sowie die Biegesteifigkeit der Randunterzüge wurde gemäß DAfStb Heft 240 (DAfStb Heft 240, 1992, S. 9 und 14) in Ansatz gebracht.

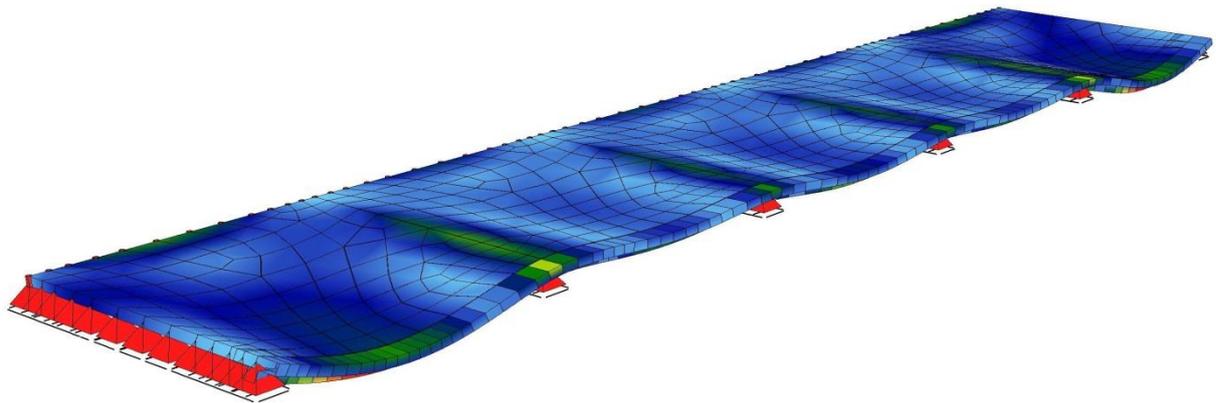


Abbildung 5-2: Verformtes Deckensystem (Eigene Darstellung)

Folgende Systemparameter wurden als konstant angenommen:

- Baustoffe: Beton C25/30, Zement CEM32,5N (S), Betonstahl B500,
- Dauerhaftigkeit, Kriechen und Schwinden: Expositionsklasse XC1, $c_{nom} = 2,5$ cm, RH = 50 %, Belastungsbeginn $t_0 = 28$ d
- Ständige Lasten: $g_{Decke} = h_{Decke} * 25$ kN/m³, $g_{Ausbau} = 2,00$ kN/m², $g_{Fassade} = h_{Fassade} * 2,00$ kN/m

Folgende Parameter wurden variiert:

- System: Durchlaufsystem mit freiem Deckenrand und Randunterzug
- Nutzlast 1: $p_k = 1,50 + 0,80$ kN/m² (gemäß DIN EN 1991-1 Kategorie A inklusive Trennwandschlag)
- Nutzlast 2: $p_k = 5,00$ kN/m² (gemäß DIN EN 1991-1 Kategorie B)
- Feldweiten: $l_{eff} = 4,00$ m, 5,00 m, 6,00 m, 7,00 m und 8,00 m
- Plattendicke: $h_{Decke} = 0,20$ m 0,25 m und 0,30 m
- Randunterzug: Höhe des Randunterzugs $h_{UZ} = 2 * h_{Decke}$; Breite des Randunterzugs $b_{UZ} = h_{Decke}$; mitwirkende Plattenbreite $b_{eff} = l_{eff} / 6$

Insgesamt wurden 80 Berechnungen zur Ermittlung der Verformungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind mit den Grenzfunktionen für die zulässige Verformung von $l/250$ und $l/500$ in den folgenden Abbildungen angegeben.

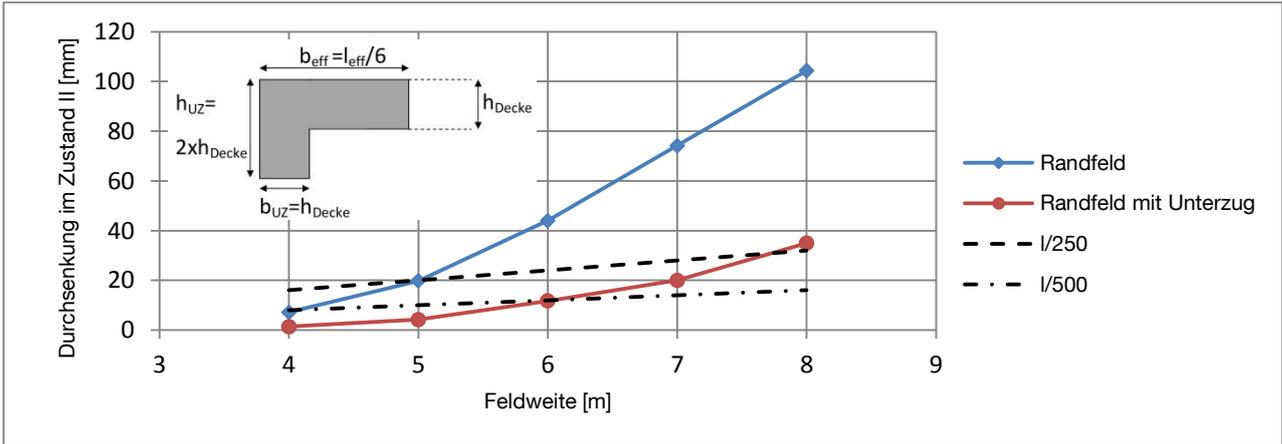


Abbildung 5-3: Randfeld, $h_{Decke} = 0,20\text{ m}$, $p = 2,30\text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

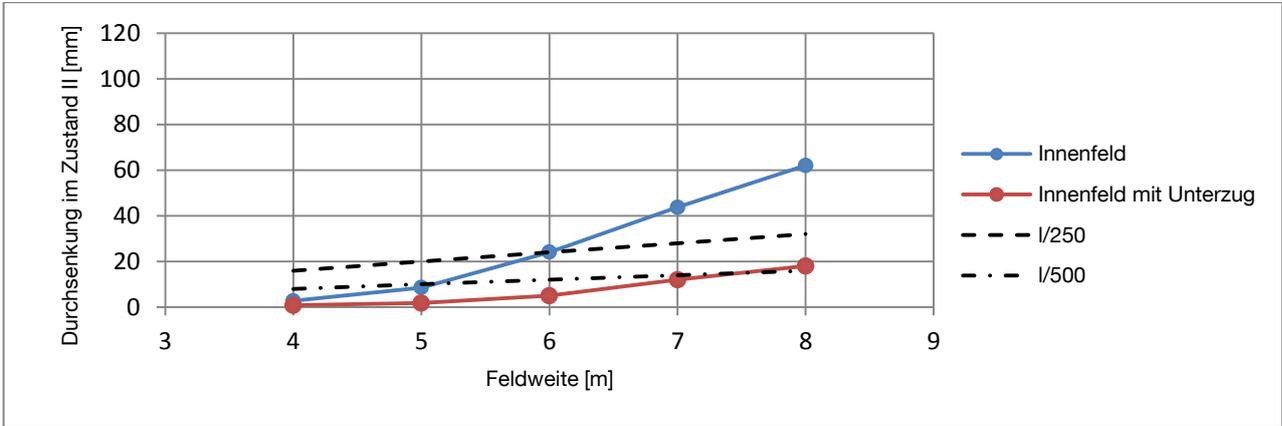


Abbildung 5-4: Innenfeld, $h_{Decke} = 0,20\text{ m}$, $p = 2,30\text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

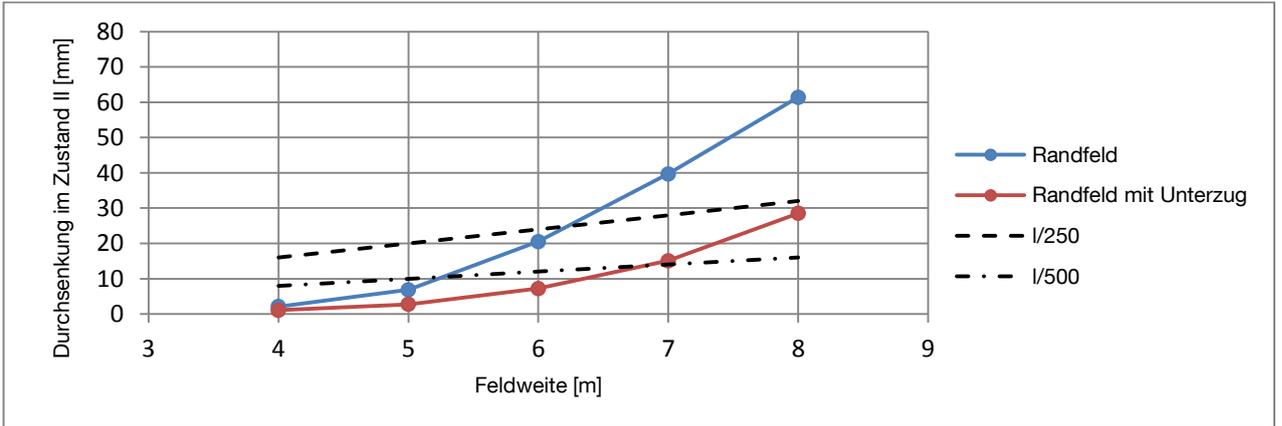


Abbildung 5-5: Randfeld, $h_{Decke} = 0,25\text{ m}$, $p = 2,30\text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

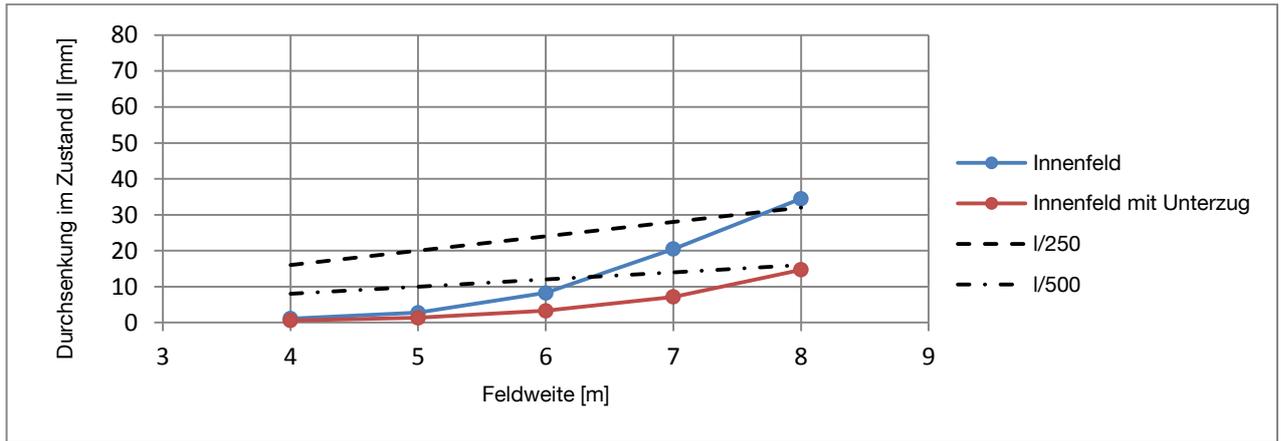


Abbildung 5-6: Innenfeld, $h_{Decke} = 0,25\text{ m}$, $p = 2,30\text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

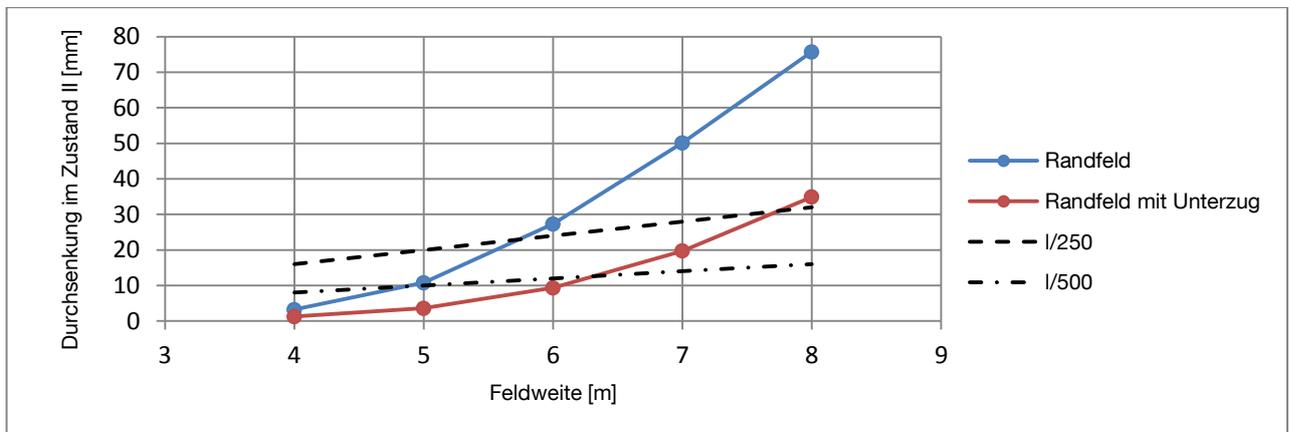


Abbildung 5-7: Randfeld, $h_{Decke} = 0,25\text{ m}$, $p = 5,00\text{ kN/m}^2$

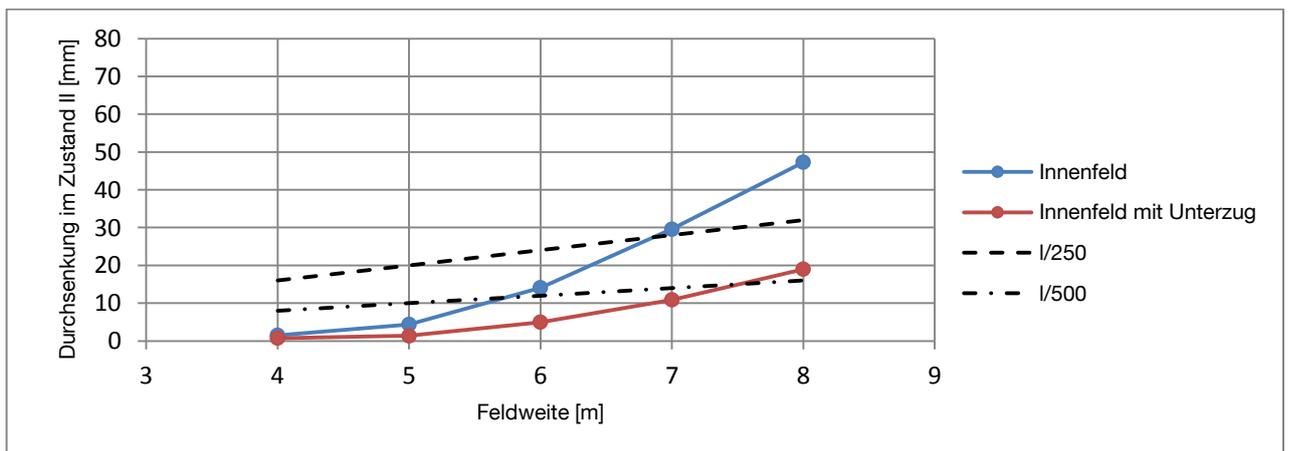


Abbildung 5-8: Innenfeld, $h_{Decke} = 0,25\text{ m}$, $p = 5,00\text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

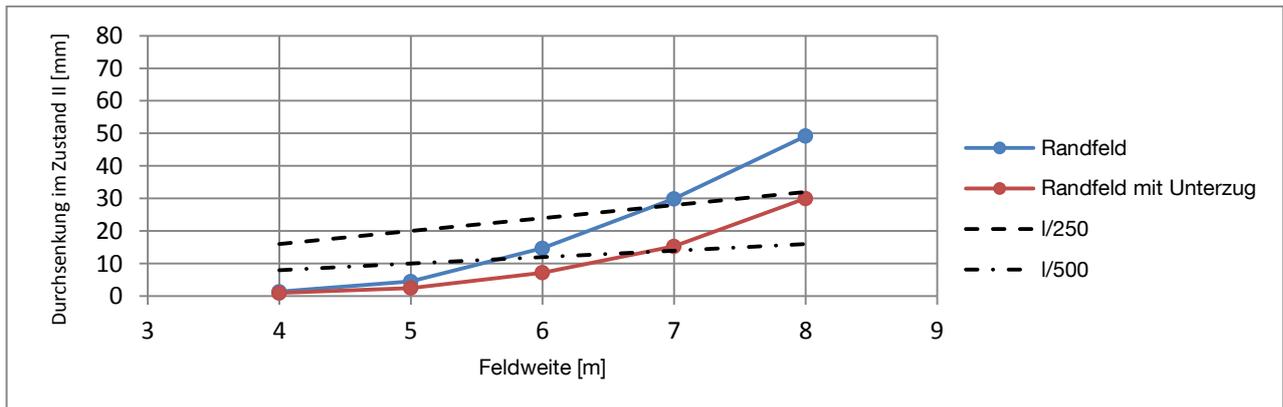


Abbildung 5-9: Randfeld, $h_{\text{Decke}} = 0,30 \text{ m}$, $p = 5,00 \text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

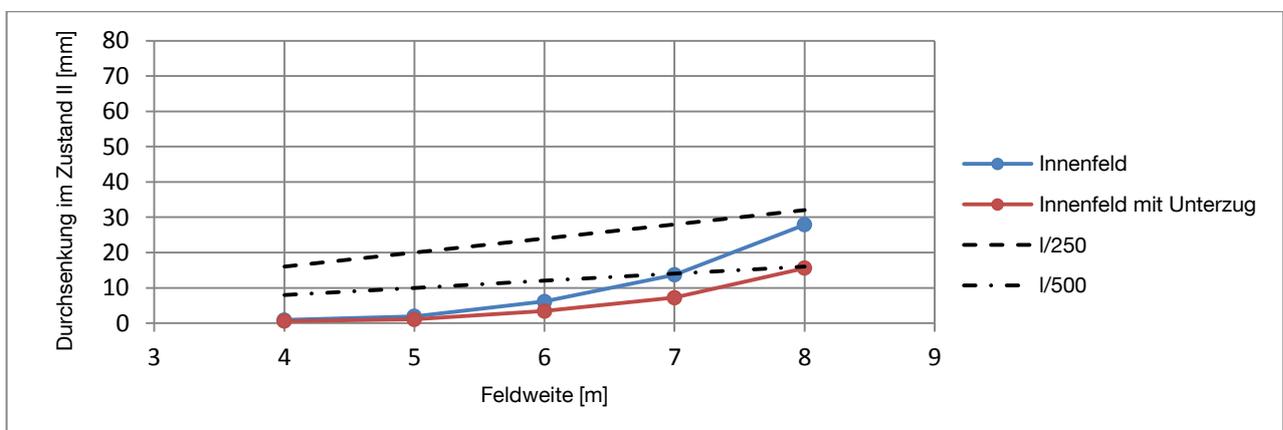


Abbildung 5-10: Innenfeld, $h_{\text{Decke}} = 0,30 \text{ m}$, $p = 5,00 \text{ kN/m}^2$ (Eigene Darstellung)

5.1.1.2 Spannbetonhohldielen

Zur Abschätzung der Verformungen bei Spannbetonhohldielen wurden Verformungsberechnungen unternommen. Aufgrund der sehr individuellen Lösungsansätze, in Bezug auf Plattenhöhe und Vorspannung, wurde eine Vordimensionierung von Ketonia dargestellt.

Folgende Systemparameter wurden als konstant angenommen:

- Baustoffe und Umweltbedingungen müssen individuell gewählt werden.
- Ständige Lasten: $g_{\text{Ausbau}} = 2,50 \text{ kN/m}^2$, $g_{\text{Fassade}} = h_{\text{Fassade}} \cdot 2,00 \text{ kN/m}$
- System: Einfeldträger

Folgende Parameter wurden variiert:

- Nutzlast 1: $p_k = 1,50 + 0,80 \text{ kN/m}^2$ (gemäß DIN EN 1991-1 Kategorie A inklusive Trennwandzuschlag)
- Nutzlast 2: $p_k = 5,00 \text{ kN/m}^2$ (gemäß DIN EN 1991-1 Kategorie B)
- Feldweiten: $l_{\text{eff}} = 5,00 \text{ m}$ bzw. $7,50 \text{ m}$ bzw. $8,00 \text{ m}$
- Plattendicke: $h = 0,20 \text{ m}$, $0,25 \text{ m}$ und $0,30 \text{ m}$

Insgesamt wurden sechs Berechnungen zur Ermittlung der Verformungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind mit den Grenzfunktionen für die zulässige Verformung von $l/500$ in den folgenden Abbildungen angegeben.

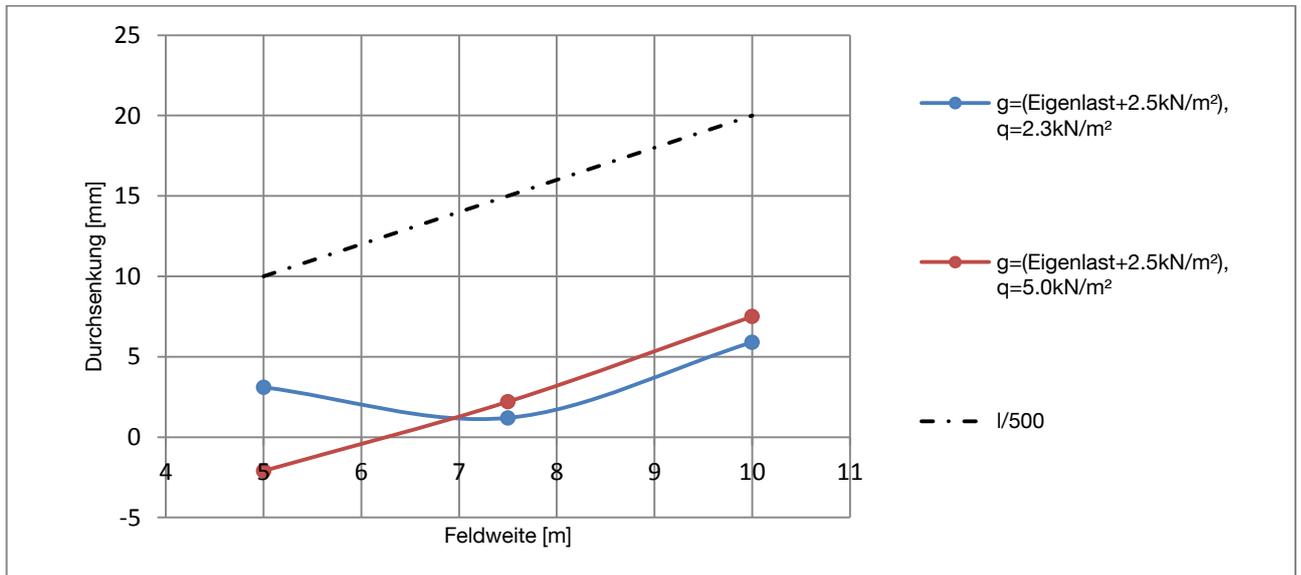


Abbildung 5-11: Durchsenkung Spannbetonhohldielen (Eigene Darstellung)

Bei Spannbetonhohldielen kann das Verformungskriterium deutlich eingehalten werden. Durch die strengen Vorgaben der bauaufsichtlichen Zulassungen ergeben sich große Spannstahlmengen wodurch unter Umständen eine bleibende Überhöhung erhalten bleiben kann. Der unterschiedliche Verformungsverlauf in Abbildung 5-11 resultiert aus unterschiedlichen Spannstahlmengen.

5.1.2 Schnittstelle

Beim statischen Nachweis einer Fassade müssen neben den Tragprofilen auch die Verbindungsmittel bemessen werden. Bei nichttragenden Elementen ist die Beanspruchung durch Windlast maßgebend. Anhand der Lasteinzugsbreite lassen sich die horizontale sowie die vertikale Belastung für einen Fassadenriegel ermitteln.

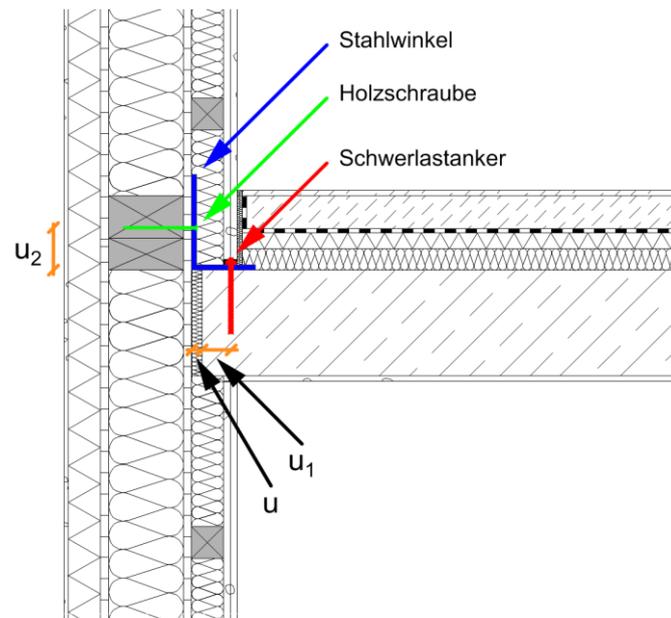


Abbildung 5-12: Schnittskizze von Detail V2 mit den Verbindungsmitteln (Eigene Darstellung)

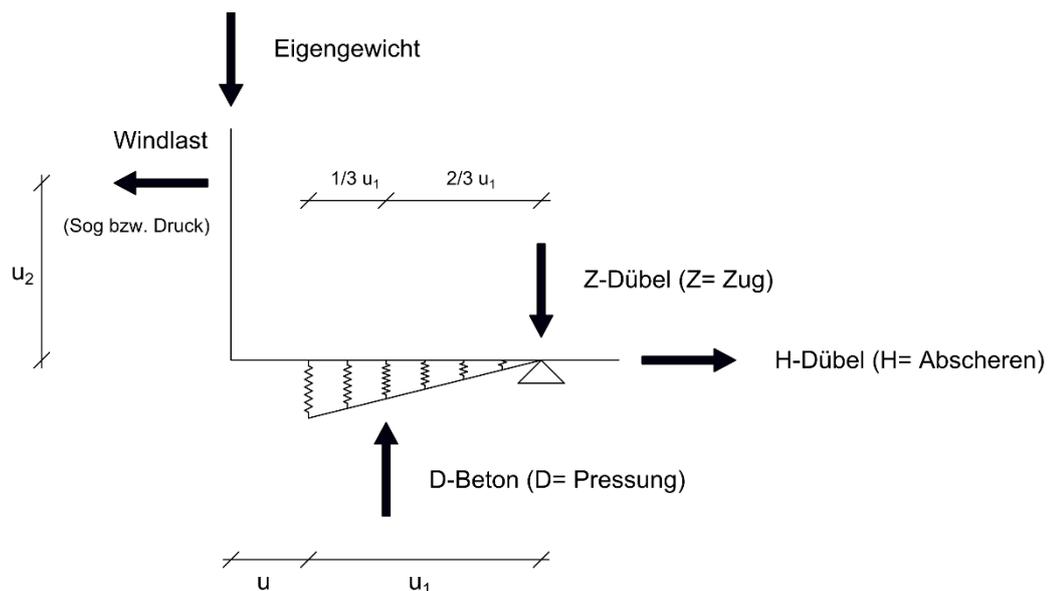


Abbildung 5-13: Statisches System des Verbindungsdetails (Eigene Darstellung)

Bei der Montage von Fassadenkonstruktionen werden vermehrt Dübelverankerungen verwendet. Folgendes Diagramm gibt einen Überblick von zulässigen Beanspruchungen von Dübeln quer zum Schafft an. Die mechanische Verbindung von dem Fassadenelement zum Massivbau wird meist mit einem Stahlwinkelprofil sowie Holzschrauben und einem Betonanker realisiert. Bei der eingestellten Bauweise werden die Eigenlasten der Holzfassade über Kontaktpression in den Massivbau eingeleitet. Es sind lediglich horizontallasten infolge Wind oder normale Abstützungs- bzw. Holmlasten zu berücksichtigen. Mithilfe der folgenden Diagramme in Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15 kann die zulässige Abscherlast eines Dübels ermittelt werden. Hierbei wird ein Beton der Güte C25/30, welcher als gerissen und normal bewehrt angesehen

werden kann, in Ansatz gebracht. Es wirkt jeweils nur eine zentrische Zug- und/oder Querkraft. Anhand eines Bolzenankers vom Typ Hilti HST wird eine Parameterstudie zur Vordimensionierung gemacht.

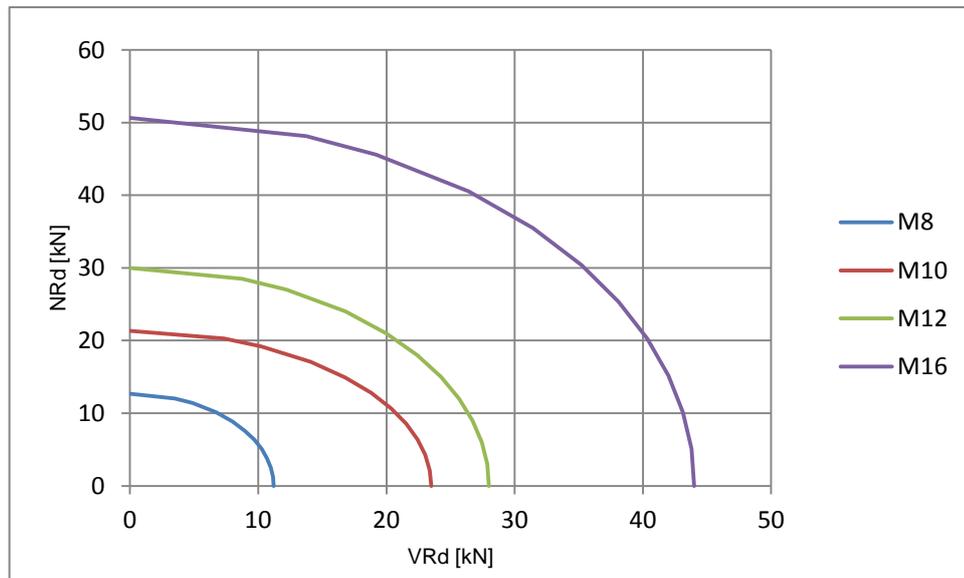


Abbildung 5-14: Interaktionsdiagramm von Schwerlastanker bei Stahlversagen (Eigene Darstellung)

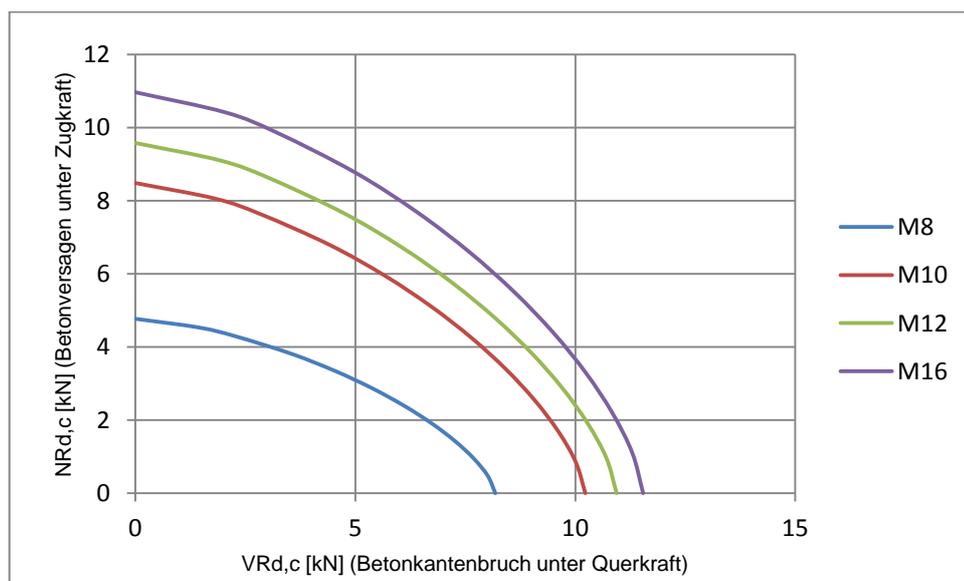


Abbildung 5-15: Interaktionsdiagramm von Schwerlastanker bei Betonversagen (Eigene Darstellung)

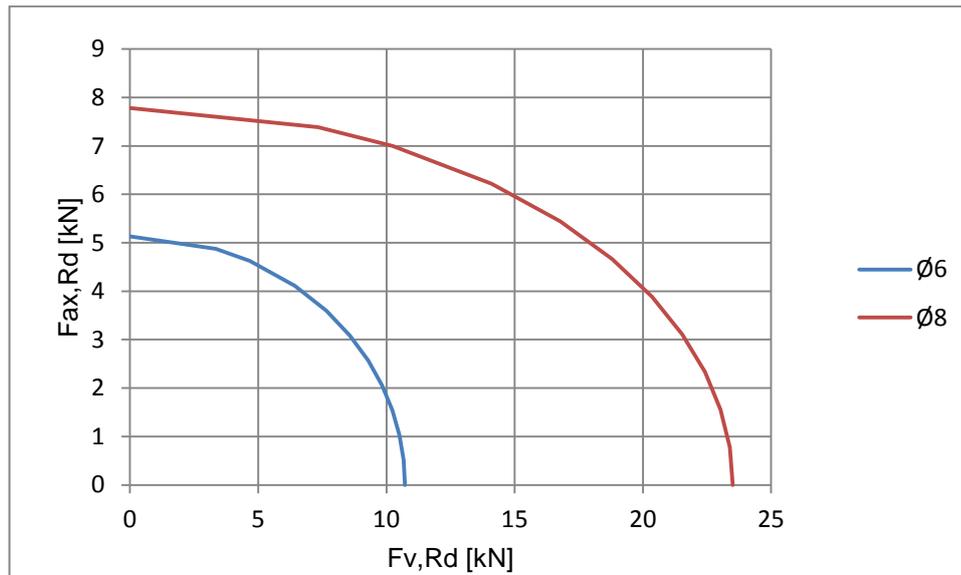


Abbildung 5-16: Interaktionsdiagramm von Holz-Vollgewindeschrauben in C24 mit minimalem Randabstand zur Ausnutzung der vollen Tragfähigkeit (Eigene Darstellung)

Des Weiteren sind die Nachweise des Stahlprofils sowie der Holzverschraubung zu führen. Der Stahlbau nachweis ist folglich ein einfacher Spannungsnachweis. Die Holzschrauben werden auf Herausziehen beansprucht.

Die vorgestellte Variante ist im Hinblick auf das Verbindungsdetail wesentlich komplizierter anzusehen, da die vertikalen Lasten über das Stahlprofil abgetragen werden müssen. Dabei ist auch entscheidend wie weit das Fassadenelement von der tragenden Massivbaustruktur entfernt steht. Maßgebliches Element ist hier meist das Stahlprofil, da dies auf Biegung beansprucht wird und man ohne Steifen auskommen möchte.

Zur Vordimensionierung des Stahlprofils kann folgender Zusammenhang verwendet werden. Mithilfe des Vergleichsspannungsnachweises werden die Anteile aus Biegung, Quer- und Normalkraft überlagert.

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{Biegung}^2 + \sigma_{Normalkraft}^2 + 3 \cdot \tau_{Querkraft}^2} \quad (5-1)$$

$$f_{pl,d} \geq \sqrt{\left(\frac{6 \cdot g_k \cdot v \cdot h_i \cdot \left(u + \frac{u_1}{3}\right)}{b_t \cdot t^2} \cdot \gamma_g + \frac{6 \cdot u_2 \cdot v \cdot h_i \cdot 0,5 \cdot q(z) \cdot c_p}{b_t \cdot t^2} \cdot \gamma_q \right)^2 + \left(\frac{v \cdot h_i \cdot 0,5 \cdot q(z) \cdot c_p}{b_t \cdot t} \cdot \gamma_q \right)^2 + 3 \cdot \left(1,5 \cdot \frac{g_k \cdot v \cdot h_i}{b_t \cdot t \cdot \sqrt{3}} \cdot \gamma_g \right)^2} \quad (5-2)$$

mit:

v	Verbindungsmittelabstand
b _t	Blechbreite Verbindungsmittel
u	Auskragung des Fassadenelements
u ₁	Abstand Aussenkante Massivbau zu Verbindungsmittel
u ₂	Abstand Oberkante Stahlbetondecke zu Holzschraube
t	Blechdicke Verbindungsmittel
h _i	Fassadenhöhe
g _k	Fassadengewicht je Laufmeter

Die Ermittlung der Schrauben- bzw. Dübelkräfte erfolgt mit einfachen Gleichgewichtsbeziehungen auf Basis von Abbildung 5-13. Die vertikal wirkende Last kann mittels dem Momentengleichgewicht bestimmt werden, wobei der Drehpunkt im 2/3 von u_1 angenommen wird.

$$H_{Dübel,d} = v \cdot h_i \cdot 0,5 \cdot q(z) \cdot c_p \cdot \gamma_g \quad (5-3)$$

$$F_{Dübel,Zug} = \frac{2}{3} \cdot \frac{v \cdot h_i \cdot g_k \cdot \gamma_g \cdot (u + u_1/3)}{u_1} \quad (5-4)$$

Für den Fall, dass eine komplexe Faltwerkbetrachtung bei der Bemessung des Stahlprofils erforderlich wird, schlägt Li (Li, 2015) als Wert für die Betonbettung folgenden Zusammenhang vor:

$$c_{Beton} = 15 \cdot f_{c,cube} \quad (5-5)$$

Als Referenzbeispiel wird eine vorgestellte Fassade gewählt. In der quasi ständigen Bemessungssituation werden die Fassadeneigenlasten durch die einzelnen Elemente in die Gründung abgeleitet. Dennoch sind die Verbindungsmittel sowohl für eine horizontale (Windlast) als auch für eine vertikale Belastung (Eigenlast Fassade) zu bemessen. Die Horizontallasten sind komplett in Ansatz zu bringen, wohingegen bei den vertikalen Lasten gesonderte Überlegungen notwendig sind. Trotz der angestrebten vertikalen Verschieblichkeit der Auflager entstehen über Reibungswiderstände vertikale Lagerreaktionen. Belastungsversuche zur Bestimmung der Verschiebesteifigkeiten an Wand-Deckenverbindungselementen, welche am MPA Bau der TU München von Merk (Merk, 2015, S.11) durchgeführt wurden bestätigen dies. Die folgende Abbildung zeigt den qualitativen Verlauf zwischen der vertikalen Reibungskraft und dem vertikalen Verschiebungsweg der zuvor genannten Versuche.

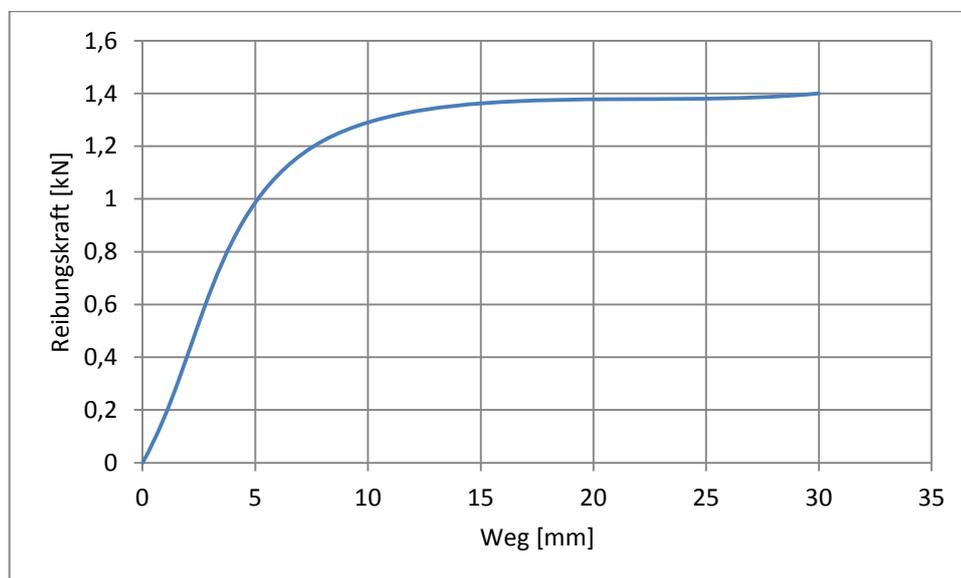


Abbildung 5-17: Qualitativer Verlauf von Reibungskraft und Weg bei Fassadenverbindungsdetails (Eigene Darstellung)

Dabei wurden Langlochverbindungen mit Gleiteinlagen (Teflon), Trennschichten zur Schallentkopplung (Sylomer) sowie die Anordnungen ohne die genannten Bestandteile untersucht. Zusätzlich wurde das Anzugsdrehmoment der Holzschrauben variiert. Grundsätzlich sind zwei Lastpfade denkbar. Zum einen kann die Fassade das Stahlbetontragwerk belasten. Zum anderen können Lasten vom Stahlbetontragwerk in die Holzfassade abgeleitet werden. Dabei ist in Abhängigkeit vom statischen System eine geeignete Last-

einflussbreite zu wählen. Da jedoch der erste Lastpfad der wahrscheinlichere ist, wird dieser im Folgenden weiter untersucht. Um diese mögliche Lastübertragung von Fassade in das Stahlbetontragwerk zu berücksichtigen wurde ein Streichlastfaktor s_f eingeführt. Dieser beschreibt den Anteil der Fassadenlast, welche rechnerisch durch die Verbindungsmittel zu berücksichtigen ist, da diese auch tatsächlich übertragen werden können. Für die quasi-ständige Bemessungssituation (Kaltbemessung) wird $s_f = 0,5$ gewählt. Für den außergewöhnlichen Brandlastfall wird der Streichlastfaktor zu $s_f = 1,0$ gesetzt, da aufgrund des Brandes ein tragendes Fassadenelement ausfallen könnte und die vertikale Lastdurchleitung nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Verbindungsmittel der darüber liegenden Fassadenelemente müssen folglich etagenweise die vertikale Last aufnehmen können. Da die Elemente mittels Langloch montiert wurden, ergibt sich ein Abgleiten des Fassadenelements um das Langlochspiel nach unten wodurch jedoch die Standsicherheit nicht beeinträchtigt ist. Die Situation wird mit folgender Darstellung verdeutlicht.

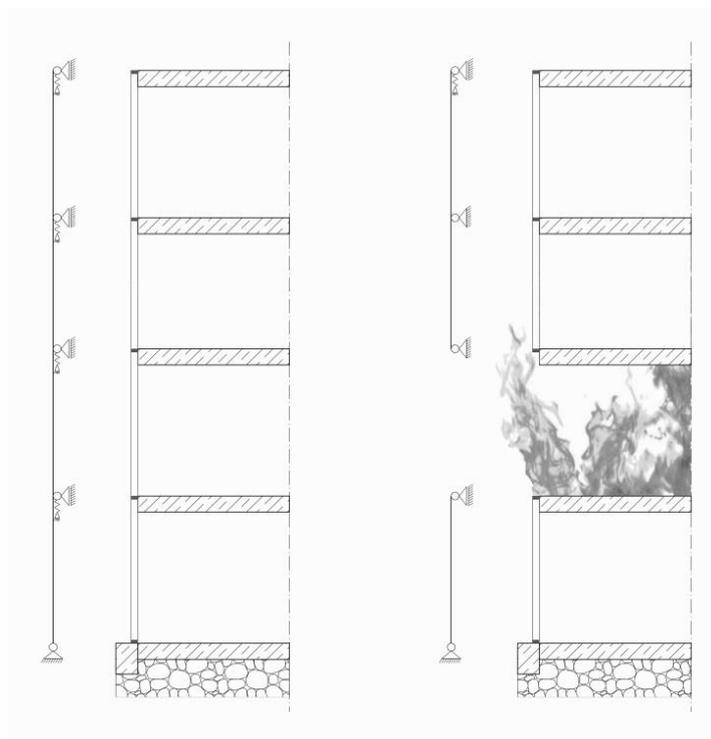


Abbildung 5-18: Statisches System Fassade bei Normal- und Brandbeanspruchung (Eigene Darstellung)

Deswegen sind die Verbindungsmittel auf folgende Situationen zu untersuchen:

Tabelle 5-1: Übersicht von Teilsicherheitsbeiwerten und Lastfaktoren bei der Bemessung von Verbindungsmitteln bei Fassadenelementen (Eigene Darstellung)

Bemessungssituation	Normalbeanspruchung (quasi-ständig)	Brandbeanspruchung (außergewöhnlich)
Teilsicherheitsbeiwerte	$\gamma_g = 1,35, \gamma_q = 1,50$	$\gamma_g = 1,00; \gamma_q = 1,00; \psi_1 = 0,00$
Streichlastfaktor	$s_f = 0,5$	$s_f = 1,0$

In diesem Fall wurden beide Situationen untersucht. Die angegebenen Formeln wurden im Folgenden für verschiedene Verbindungsmittelabstände v und Auskragungen u_1 grafisch ausgewertet. Folgende Werte wurden angenommen:

- Windzone 2, küstennahe Region
- Bezugshöhe des betrachteten Fassadenelements: $z = 22\text{m}$; $g(z) = 1,11 \text{ kN/m}^2$
- Regelbereich (D gem. EC1), keine Sogspitzen $c_p = 0,8$
- Verbindungsmittel als Flachstahl S235 mit $b_t = 120 \text{ mm}$ und $t = 12\text{mm}$
- Fassadenelementhöhe $h_f = 4,0 \text{ m}$
- Fassadeneigengewicht $g_k = 1,20 \text{ kN/m}^2$
- Auskragung des Fassadenelements $u = 3,00 \text{ cm}$
- Dübelabstand zum Deckenrand $u_1 = 10,0 \text{ cm}$
- Abstand Holzschraube zu Oberkante Stahlbetondecke $u_2 = 5,00 \text{ cm}$

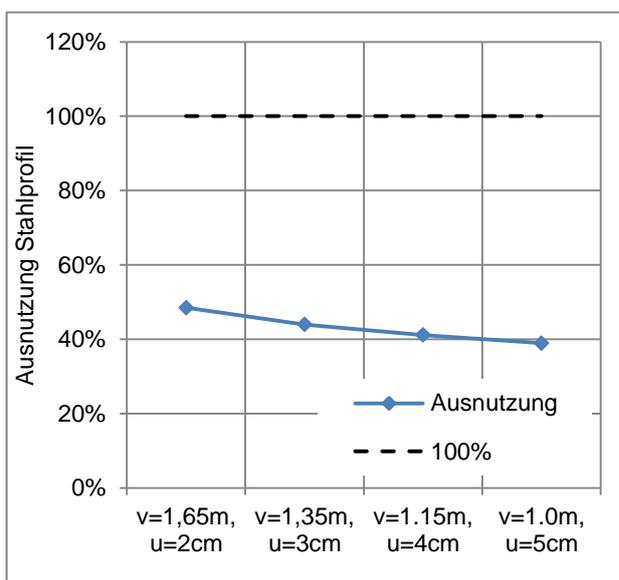


Abbildung 5-19: Ausnutzung Stahlprofil für die normale Bemessungssituation (Eigene Darstellung)

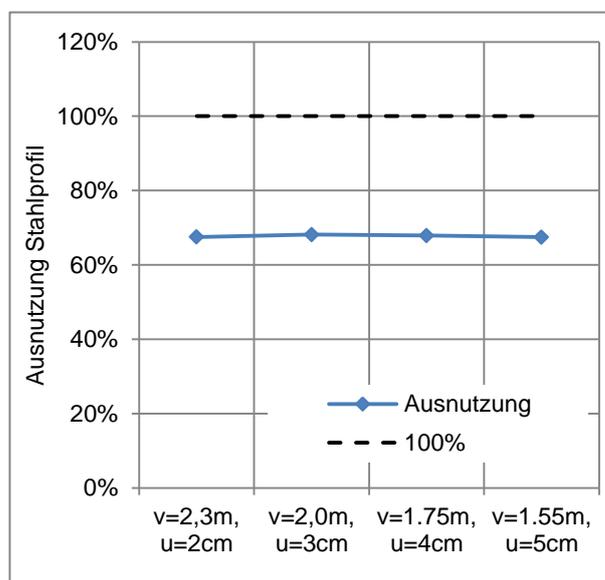


Abbildung 5-20: Ausnutzung Stahlprofil für die Brandbeanspruchung (Eigene Darstellung)

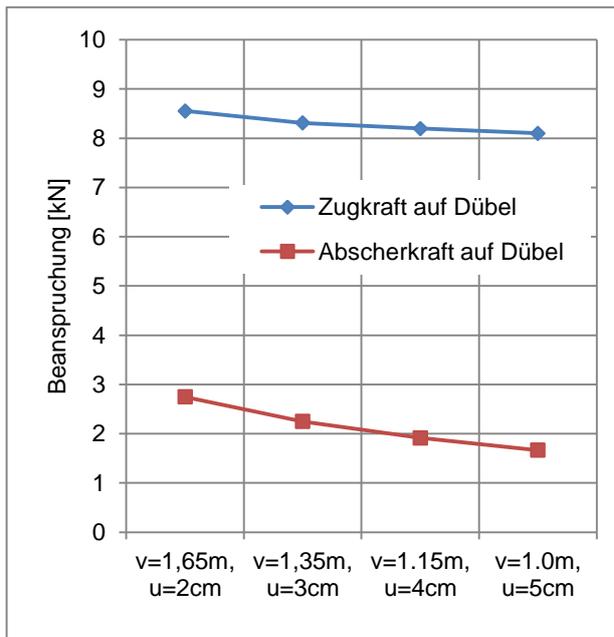


Abbildung 5-21: Dübelkräfte für die normale Bemessungssituation (Eigene Darstellung)

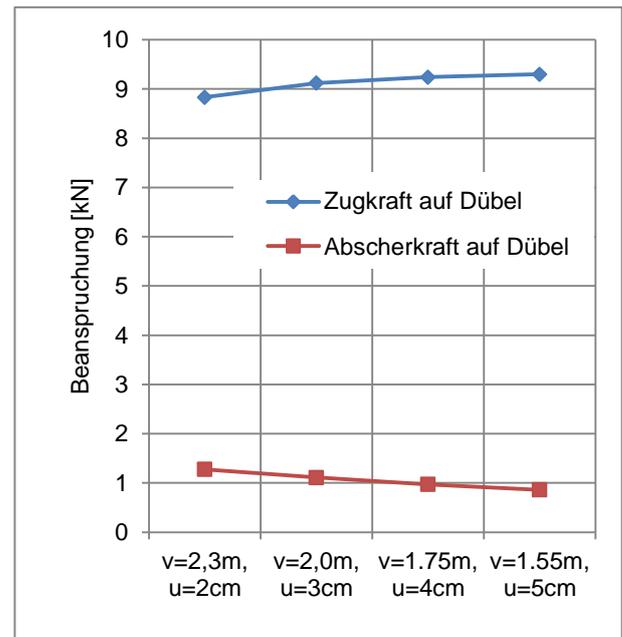


Abbildung 5-22: Dübelkräfte für die Brandbeanspruchung (Eigene Darstellung)

Anhand dieser Beispielbetrachtung erkennt man, dass der maßgebende Nachweis für das Stahlprofil in der Brandbemessung zu führen ist. Wohingegen für die Dübelbemessung für die normale Bemessungssituation maßgebend wird. Eine Betrachtung von beiden Zuständen ist also notwendig. Somit kann folgendes Bemessungsergebnis festgehalten werden:

- Verbindungsmittelabstand $v = 1,35 \text{ m}$
- Auskragung $u = 3,00 \text{ cm}$
- Stahlwinkel $b_t = 120 \text{ mm}$, $t = 12 \text{ mm}$
- Schwerlastanker 1 x M12
- 2x Vollgewindeholzschraube $\text{Ø}8$

Hinweis zur Beispielbetrachtung:

Die Dimensionierung ist nicht allgemeingültig. Eine separate Berechnung ist unerlässlich, wodurch abweichende Bemessungsergebnisse möglich oder auch wahrscheinlich sind.

Die Bemessung erfolgte nach der praktischen Umsetzbarkeit der Anschlüsse, sodass sowohl die normativen Anforderungen als auch die praktischen Gesichtspunkte erfüllt werden.

Abschließend muss festgehalten werden, dass ebenso bei der eigenstellten Fassadenkonstruktion vertikale Verformungen der Stahlbetondecke kompensiert werden können.

5.2 Bauteilversuche zum Verformungsverhalten Stahlbeton-Tragwerk im Zustand II

5.2.1 Motivation

Bei Hybridbauten stellt die Schnittstelle zwischen der tragenden Stahlbetonstruktur und den Fassadenelementen eine planerische Herausforderung dar. Die Berechnung des Stahlbetontragwerks sollte in enger Abstimmung mit dem Fassadenplaner / Holzbauunternehmen erfolgen, da dieser detaillierte Vorgaben bezüglich der anzusetzenden Last bzw. der Lasteinleitung zu erstellen hat. Aus den Angaben des Fassadenplaners sowie den restlichen anzusetzenden Lastfällen wird die maßgebende Lastfallkombination zur Bemessung des Tragwerks im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ermittelt. Dabei ist im speziellen auf die Verformungsberechnung hinzuweisen. Die ermittelten Verformungen sind anschließend dem Fassadenplaner zur Beurteilung der Verträglichkeit zu übermitteln.

Durch die stetig wachsenden Möglichkeiten der numerischen Berechnungsmethoden lassen sich mit relativ geringem Aufwand unter anderen Verformungsberechnungen im gerissenen Zustand II ermitteln. Die Berechnungen sind meist ohne fundierte Kenntnisse der meist eingesetzten Finiten-Element-Methode und des komplexen Werkstoffverhaltens des Stahlbetons möglich, wobei dies dringend notwendig wäre. Eine Verifizierung der Berechnungsergebnisse findet in der Praxis kaum statt. Versuchsergebnisse zur Validierung mit einfachen Systemen und aktuellen Baustoffen sind zudem kaum vorhanden. Für Untersuchungen zur Plattenbiegung ist lediglich Jaccoud und Favre (Jaccoud, Favre, 1982) zu nennen, die das Langzeitverhalten untersucht haben. Bei meist allen vorhandenen Versuchen aus der Literatur werden diese in einem relativ kleinen Zeitrahmen von maximal mehreren Stunden durchgeführt. Effekte aus Kriechen und Schwinden sind somit nur ungenügend abgebildet. Aus diesem Grund wurden am Materialprüfamt der TU München großformatige Bauteilversuche für Biegung, Querkraft und Torsion durchgeführt. Mit den ermittelten Last-Verformungsbeziehungen sowie Baustoffeigenschaften können Verformungsberechnungen verifiziert werden, wodurch das Verständnis für das Tragverhalten verbessert wird.

5.2.2 Versuchskonzeption

Das Versuchsprogramm umfasst Körper zur Betrachtung der Biegetragfähigkeit bei Balken und Platten, sowie der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit bei Balken unter Dauerlast. Bei der Großzahl der bisher unternommenen Versuche wurden stets die Querschnittsabmessungen, die Baustoffe oder die Bewehrungsanordnung variiert. Versuche im Hinblick auf das Langzeitverhalten des Betons oder des Stahls wurden bisher kaum unternommen. Dazu wurden großformatige Versuchskörper erstellt, um das Langzeitverhalten unter einer Dauerlast zu untersuchen. Das Versuchsprogramm gliedert sich in zwei Versuchsserien. Bei der ersten Serie wurden die Körper bis zum Versagen gefahren. Mit den ermittelten Versagenslasten wurden sodann für die Serie Zwei die Dauerlasten für die Langzeitversuche festgelegt. In diesem Fall wählte man 50% der Bruchlast als Dauerlast. Die Versuchskörper wurden mit einem praxisüblichen Bewehrungsgehalt armiert. Des Weiteren wurde die Betongüte C25/30 angestrebt. Die Querschnittsabmessungen der Torsionsträger orientierten sich an den Versuchen von Zedler (Zedler, 2011) und Leonhard (Leonhard, 1974) damit weitere Vergleiche unternommen werden können. Die Dimensionierung der restlichen Versuchskörper erfolgte unter dem Gesichtspunkt, dass die Abmessungen noch praxisüblichen Dimensionen entsprechen und gleichzeitig die erforderlichen Lasten, im Hinblick auf die Dauerbelastung, nicht zu groß werden.

5.2.3 Versuchsauswertung

5.2.3.1 Langzeitversuche

Bei dem durch Biegung beanspruchten Körper zeigte sich, dass sich die Steifigkeiten bei beiden Serien auf einem ähnlichen Niveau einstellen, wobei eine Tendenz zur Zunahme zu verzeichnen ist. Die kann infolge der Nacherhärtung des Betons begründet werden. Die Bruchlasten der Biegeträger befinden sich in einem Korridor von $\pm 14\%$.

Die Auswirkungen infolge der Dauerlast sind beim Torsionsträger größer. Sowohl die Bruchlast als auch die Steifigkeit sind geringer als die Ermittelten im Kurzzeitversuch. Bei allen Versuchskörpern stellte sich eine Zunahme der Verformungen, im Vergleich zu den Kurzzeit- und Langzeitversuch ein.

Tabelle 5-2: Tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse (Eigene Darstellung)

Bezeichnung:	Serie 1		Serie 2		Veränderung		
	Bruchlast	Steifigkeit	Bruchlast	Steifigkeit	Bruchlast	Steifigkeit	Verformungen
Torsion	41,96 kNm	520 kNm/rad	31,99 kNm	690 kNm/rad	-23,7%	-32,7%	+36%
Biegung	92,67 kN	4,95 kN/mm	82,64 kN	5,6kN/mm	-12,1%	+11,8%	+30%
Querkraft	132,67 kN	7,26 kN/mm	151,54 kN	8,71kN/mm	+14,2%	+19,9%	+41%
Platte	42,46 kN	1,22 kN/mm	47,34 kN	2,00kN/mm	+11,5%	+63,4%	+24%

Bei allen Versuchskörpern zeigte sich, dass die Verformungen zu Beginn der Messperiode am stärksten zunehmen und gegen Ende hin einem Grenzwert entgegen laufen. Die Ergebnisse der Dauerversuche sind im Untersuchungsbericht aufgeführt. (Untersuchungsbericht Nr. 01-CV-23168829, 2016)

5.2.3.2 Stahldehnungen

Mithilfe von Dehnmessstreifen wurden die Dehnungen dokumentiert. Der Betrag der Dehnungen variierte relativ stark. Da ein Dehnmessstreifen lediglich nur einen Messpunkt auswertet, können gegebenenfalls auch minder beanspruchte Stellen dokumentiert werden. Durch Tension-Stiffening erfährt der Stahl in einem Riss eine andere Dehnung als in ungerissenen Bereichen. Allgemein ist zu erkennen, dass bei dem Biegeträger B2, bei dem Querkraftträger Q2 und bei der Platte P2 eine relativ konstante Stahldehnung der Bewehrung vorhanden ist. Im Gegensatz dazu steigt beim Torsionsträger T2 und der Platte T2 die Stahldehnung linear an und erreicht bei 30 Tagen ein konstantes Plateau. Verformungszuwächse sind ab diesem Zeitpunkt nicht mehr dem Stahl geschuldet. Die Stahldehnungsdiagramme über die Zeit sind dem Untersuchungsbericht (Untersuchungsbericht Nr. 01-CV-23168829, 2016) zu entnehmen.

Weiteren wurden am Torsionsträger Messungen mit optischen Messfasern unternommen. Anhand dieser kontinuierlichen Messung entlang des Längsstabes konnten die Dehnungen lückenlos dokumentiert wer-

den. Rückschlüsse auf das Tragverhalten konnten gemacht werden. Beispielsweise konnte das allgemein bekannte Fachwerkmodell bestätigt werden. Die Dehnungen steigen und fallen wellenartig. Dies ist dadurch zu begründen, dass sich eine Druckstrebe gegen die Längsbewehrung abstützt. Nach der Umlenkung wird das Längsisen wieder entlastet. In Bereichen von Rissen zeigt sich ein absolutes Extremum. Das Mitwirken des Betons unter Zug existiert in diesem Fall nicht.

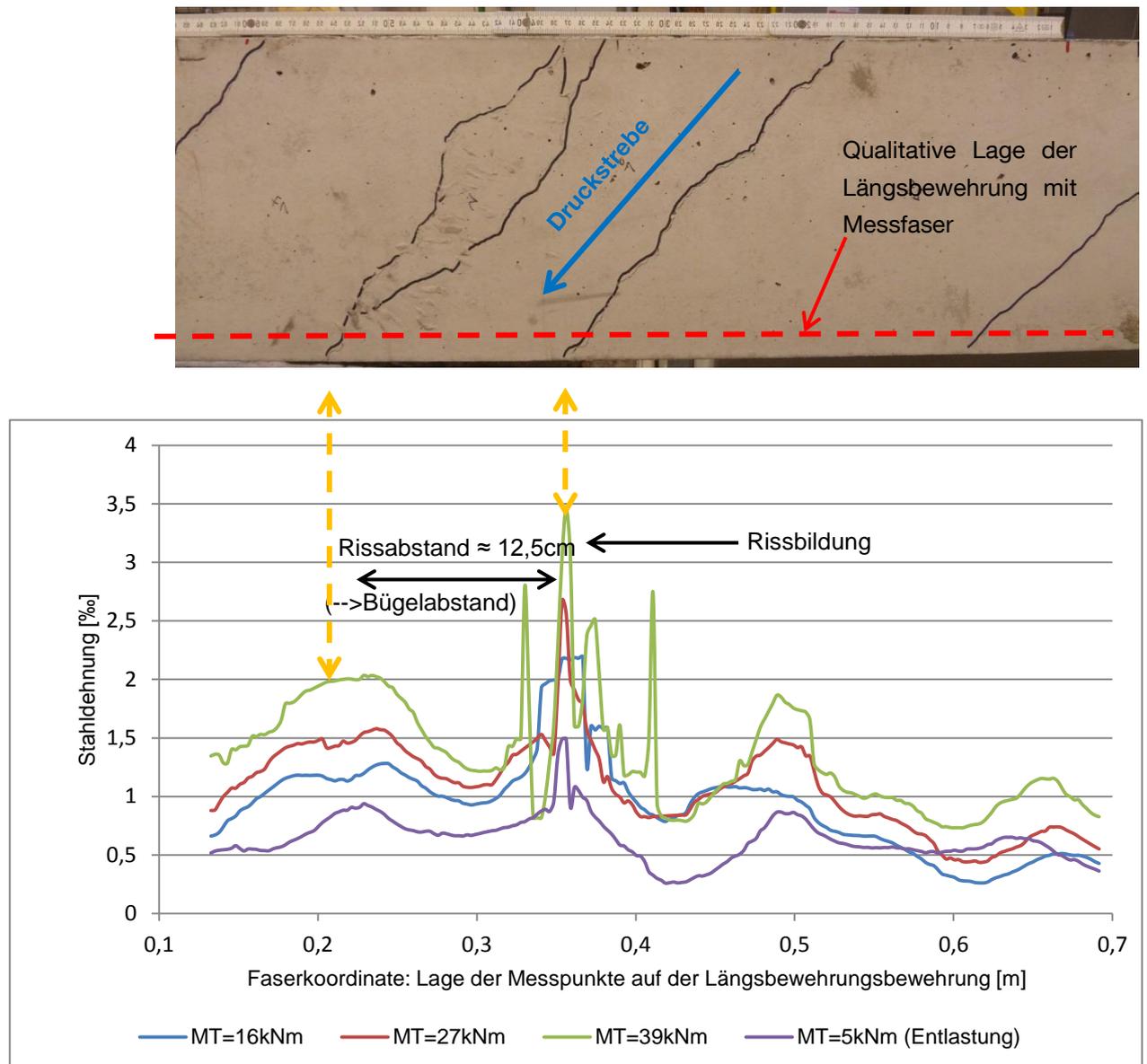


Abbildung 5-23: Rissbild mit zugehörigen Dehnungsverlauf der Längsbewehrung bei verschiedenen Laststufen (Eigene Darstellung)

5.2.3.3 Betonstauchungen

Mittels Setzdehnungsmesser wurden die Betondehnungen gemessen. Es zeigten sich bei den einzelnen Trägern unterschiedliche Ergebnisse. Bei der Platte P2 wurde aufgrund der geringen Bauteilhöhe lediglich die Stauchung der Betondruckzone gemessen. Die Stauchung nahm zum Ende der Messperiode einen Grenzwert von ca. 1.3‰ an, wodurch das Abklingen der Bauteilverformungen erklärt werden kann.

Beim Biegeträger B2 wurde ein komplexeres Tragverhalten über die Zeit festgestellt. Zu Beginn der Messperiode wurde ein Druckbogen festgestellt, der nicht bis an das Auflager reicht. Der Restliche Lastabtrag erfolgt als Fachwerk. Im weiteren Belastungsverlauf werden die anderen Messtrecken auf Druck aktiviert. Es handelt sich um eine Mischung aus flacheren und steileren Druckstreben. Es ist sowohl der Druckbogen als auch das Fachwerk nachweisbar. Die Betondruckzone im Bereich der Lasteinleitung erfährt wiederum einen ähnlichen Stauchungsverlauf wie bei der Platte, wobei die größte Stauchung bei 1,68‰ lag.

Beim Querkraftträger Q2 konnte eine solche Umlagerung über die Zeit nicht dokumentiert werden. Das Fachwerk ist wiederum nachweisbar. Die Messtrecken 1.1 und 1.2 wurde maximal mit 0,31‰ gestaucht, wohingegen der Wert von 2 bei 0,25‰ lag. Die Stauchung der Betondruckzone im Bereich der Lasteinleitung ist wiederum ähnlich wie bei P2 und B2 und erreicht einen Wert von 1,75‰.

Beim Torsionsträger zeigten die Messtrecken vom Typ 1 unterschiedliche Belastungsniveaus. Diese nahmen aber im Laufe der Belastungsdauer aber gleichmäßig zu. Im Mittel betragen diese 0,65‰. Die Messtrecken 2 und 3 verlaufen qualitativ ähnlich wie die des Typs 1, wobei maximal eine mittlere Stauchung von 0,5‰ festgestellt werden konnte. Es zeigt sich, dass auch Stauchungen rissübergreifend dokumentierbar sind und somit auch flachere Druckstrebenanteile wirken, als wie es das Rissbild vermuten ließ.

5.2.3.4 Risswachstum bei den Dauerversuchen

Das Risswachstum bzw. die Rissentwicklung wurde mittels Markierung durch einen Farbstift dokumentiert. Die Risse, welche bei der Aufbringung der Dauerlast auftraten wurden mit einem schwarzen Stift nachgefahren. Die folgenden Rissen, welche während der Dauerlast auftraten wurden mit einem roten Farbstift angetragen und das zeitliche Auftreten notiert. Am Ende der Dauerlast wurden, wie eingangs schon erwähnt die Körper nochmals bis zur Bruchlast beansprucht. Die sich einstellenden Risse wurden mit einem blauen Farbstift markiert. Nachdem der Dauerstandversuch beendet war, wurden die Risse in ihrer Länge vermessen, umso einen Summenbetrag zu erhalten. Entsprechend Ihrem Auftreten wurde ein Prozentsatz ermittelt, dass eine Angabe erfolgen kann ob zu Beginn der Lastaufbringung, während der Dauerlast oder zur Schlussprüfung das Risswachstum erfolgte. Die folgenden Diagramme zeigen dies.

Es lässt sich feststellen, dass sich bei den Versuchskörpern, welche überwiegend mit Biegung (B2 & P2) beansprucht sind die Risse während der Dauerlast hinzukommen. Zur Schlussprüfung kommen kaum noch nennenswert Risse hinzu. Das heißt, dass anhand der Rissmenge nur schwer zu beurteilen ist ob das Bauteil nahe seiner Maximallast ist. Um dies zu beurteilen sind vermehrt die globalen Verformungen sowie der Betrag der Rissöffnung zu betrachten.

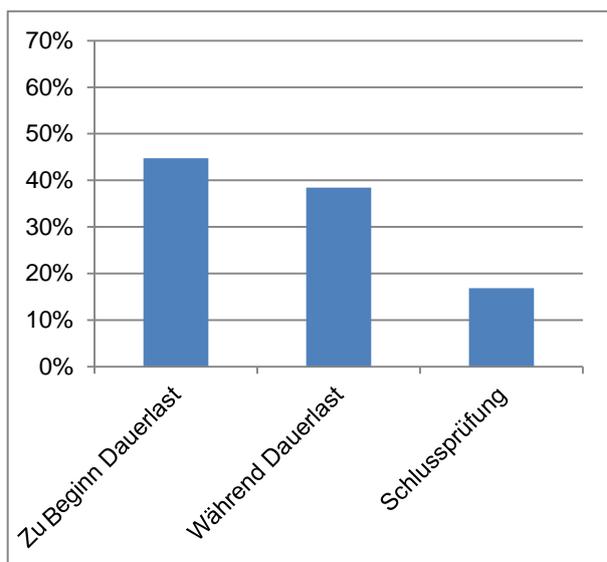


Abbildung 5-24: Rissentwicklung Biegung (Eigene Darstellung)

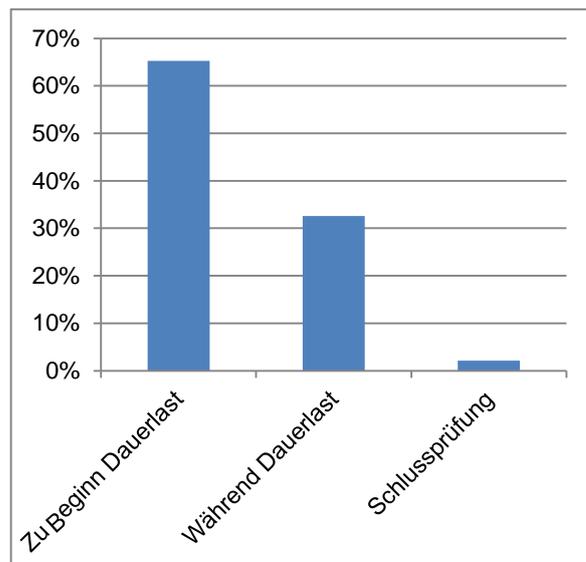


Abbildung 5-25: Rissentwicklung Platte (Eigene Darstellung)

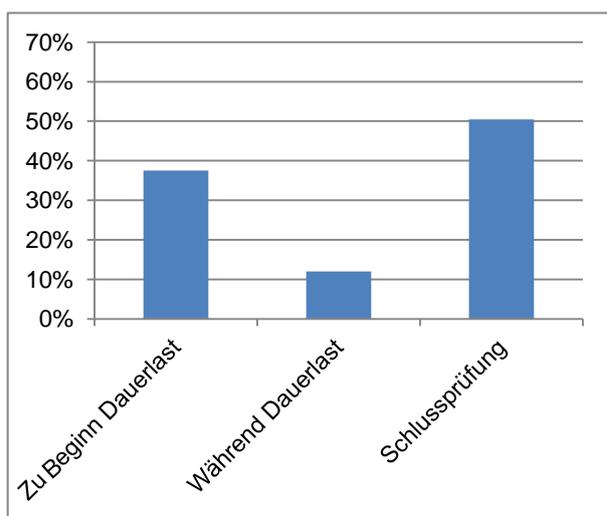


Abbildung 5-26: Rissentwicklung Querkraft (Eigene Darstellung)

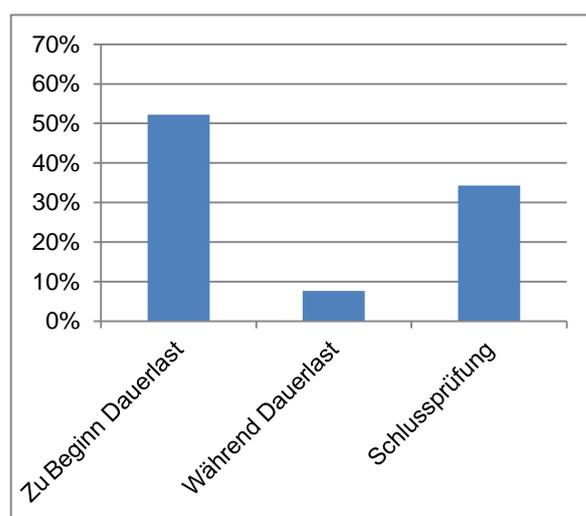


Abbildung 5-27: Rissentwicklung Torsion (Eigene Darstellung)

Bei den vorrangig auf Schub beanspruchten Bauteilen (Q2 & T2) zeigt sich, dass vor allem zur Schlussprüfung sich eine Zunahme von Rissen einstellte. Die Schubrisse beim Querkraftträger Q sowie die Spiralarisse beim Torsionsträger T stellten sich vor allem bei einer Laststufe über dem Dauerlastniveau ein. Das heißt sofern ein abgeschlossenes Schubrissbild oder Spiralarissbild zu verzeichnen ist, kann man davon ausgehen, dass sich der Träger relativ nahe an der maximalen Tragfähigkeit befindet.

Eine genauere Dokumentation der Rissentwicklung nach Zeitpunkten ist in Diagrammform dem Untersuchungsbericht (Untersuchungsbericht Nr. 01-CV-23169929, 2016) zu entnehmen.

5.2.3.5 Zusammenfassung

Das Langzeitverhalten von Stahlbetontragwerken ist besonders zu untersuchen. Ableitungen von normalen Bruchversuchen auf das Verformungsverhalten für $t=\infty$ sind nicht ohne weiteres zulässig. Mithilfe der unternommenen großformatigen Versuche kann eine Prognostizierung des Verformungsverhaltens verbessert werden. Die Zunahme der Verformungen unter Langzeitbelastung lag zwischen 24-40%. Ebenso lagen die Bruchlasten nach der Dauerlast bei den auf Biegung beanspruchten Versuchsbalken in einem Korridor von ca. $\pm 10\%$. Einzig der Torsionsträger zeigte eine wesentliche Reduktion der Traglast. Sofern man bei Torsionsträger die Verformungen begrenzen möchte, sollte die Auslastung erheblich reduziert werden. Mit den durchgeführten Dauerversuchen konnten die Tragmechanismen in Abhängigkeit der Zeit aufgezeigt werden. Zudem können Rechenmodelle auf ihre Qualität hin überprüft und verifiziert werden.

5.2.3.6 Empfehlungen für die Tragwerksplanung

Mithilfe der Versuche konnten Last-Verformungsbeziehungen für den Zustand II sowie durch zeitabhängige Einflüsse infolge Kriechen Schwinden nach 70 Tagen anhand der Versuchsserie 2 quantifiziert werden. Das zugrunde gelegte Lastniveau betrug 50% der Bruchlast. Zu den Versuchsergebnissen wurden Verformungsberechnungen nach der Elastizitätstheorie durchgeführt, um Vergleiche mit dem ideellen ungerissenen Zustand I durchführen zu können. Diese werden häufig bei statischen Berechnungen in der Praxis ausgegeben. Mit den gewonnenen Faktoren können Rückschlüsse auf Verformungsberechnungen im Zustand I auf den Zustand II (mit oder ohne Kriechen und Schwinden) vorgenommen werden.

Tabelle 5-3: Verformungen der Versuchskörper bei 50% der Bruchlast (Eigene Darstellung)

Verformungen:				
Versuchskörper	Biegung Platte [cm]	Biegung Balken [cm]	Querkraft [cm]	Torsion [1/m]
Zustand I (Berechnet nach der E-Theorie, ungerissener Zustand)	0,28	0,260	0,310	0,001
Zustand II (t_0) (gerissener Zustand)	1,968	0,913	0,685	0,016
Zustand II ($t=70$ d) (gerissener Zustand inkl. Kriechen & Schwinden)	2,403	1,192	0,968	0,022

Die nachfolgend angegebenen Faktoren basieren auf Versuchen mit einer konkreten Dimensionierung und vorgegebenen Randbedingungen. Diese können dem Untersuchungsbericht (Untersuchungsbericht Nr.

01-CV-23169929, 2016) entnommen werden. Das Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen hängt im Zustand II von vielen Einflussfaktoren ab. Das Kriechen und Schwinden wird beeinflusst von dem statischen System, dem Lastniveau, dem nichtlinearem Materialverhalten des Betons, den Querschnittsabmessungen, den Bewehrungsgehalten sowie den Umweltbedingungen. Somit sind globale Erhöhungsfaktoren aufgrund der Vielzahl an Einflüssen unter Vorbehalt zu formulieren. Zur weiteren Differenzierbarkeit wurde für die Platte eine Abhängigkeit der Biegeschlankheit die Faktoren weiter untergliedert. Dies erfolgt in Abhängigkeit der Biegeschlankheit. Somit werden Systemparameter mit der Feldweite l zur statischen Nutzhöhe d berücksichtigt. Ergänzend zu den eigenen Versuchen wurden die Ergebnisse des Versuchskörpers C11 von Jaccoud und Favre (Jaccoud und Favre, 1982) aufgenommen, die eine Biegeschlankheit von $l/d=30$ aufwiesen.

Tabelle 5-4: Verformungsfaktoren Zustand I und Zustand II (Zustand II mit Kriechen und Schwinden nach 70d) (Eigene Darstellung)

Versuchskörper	Faktoren:				
	Biegung Platte		Biegung Balken	Querkraft	Torsion
	$l/d = 20$	$l/d = 30$			
Zunahme der Verformungen vom Zustand I auf den Zustand II:	8	3,5	3,5	2,2	13
Einfluss Kriechen und Schwinden nach $t=70d$ im Zustand II:	1,25	2	1,3	1,4	1,4
Zunahme der Verformungen vom Zustand I auf den Zustand II nach $t=70d$:	10	7	4,6	3,1	18

Für eine ausführliche Versuchsauswertung wird auf den Untersuchungsbericht (Untersuchungsbericht Nr. 01-CV-23168829, 2016) verwiesen.

5.3 Geometrische und materialspezifische Wärmebrücken

5.3.1 Grundlagen

Im Rahmen der Parameterstudie der geometrischen und materialspezifischen Wärmebrücken werden ausgehend von den in Kapitel 5.3.2 vorgestellten Beispielprojekten unterschiedliche Dämmstandards mit verschiedenen Bauteilkonstruktionen verglichen. Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf die Projekte:

- Boyenstraße, 7-geschossiges Nullemissionshaus, Berlin
- CO₂-neutrale Grundschule Hamburg
- LCT-One, Dornbirn
- Bildungszentrum „Tor zur Welt“, Hamburg
- Wohnsinn 2, Darmstadt

Die bauphysikalischen Grundlagen können Kapitel 2.3 entnommen werden. Ziel der Parameterstudie ist die Ableitung von Konstruktionsregeln und die Erarbeitung von optimierten Bauteilanschlüssen hinsichtlich des Wärmeschutzes.

Für die Berechnung der zweidimensionalen Wärmebrücken wird die Open Source Software THERM 7.3 des Lawrence Berkeley National Laboratory verwendet. Die nachfolgenden Anschlussdetails wurden mit Hilfe des von Daniel Kehl und Robert Borsch-Laaks verfassten Handbuches und der Excel-Datenblätter berechnet und bewertet. Alle Eingabedetails können dem kostenpflichtigen Handbuch entnommen werden. Beispielsweise müssen bei der Berechnung der Anschlussdetails geometrische Randbedingungen wie die 1-Meter-Regel eingehalten werden. Dabei muss der Abstand der adiabatischen Bauteilkante vom zentralen Anschlusselement mindestens einen Meter betragen. Sind die Abstände geringer oder wesentlich größer, führt dies ansonsten zu Fehlern in der Berechnung des Wärmebrückenkoeffizienten.

Die Randbedingungen nach Anhang 1, Tabelle A2 im Anhang sind nach der DIN 4108 Beiblatt 2:2006-03, Tabelle 7 definiert und zur Berechnung der Wärmebrücken und Oberflächentemperaturen und in der Boundary Condition Library von THERM hinterlegt.

Da es sich bei den Beispielprojekten um hochgedämmte Bauteile handelt, fällt die Oberflächentemperatur nicht in den kritischen Bereich der Schimmelpilzbildung. Aus diesem Grund beschränkt sich die Betrachtung der Wärmebrücken in Kapitel 5.3.3 zunächst auf den außenmaßbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e . Die Materialdaten zu den in 5.3.2 vorgestellten Anschlussdetails wurden der Software hinterlegt und können der Anhang 1, Tabelle A1 entnommen werden. Die Erklärung der Bauteilschraffuren und Farbuweisungen erfolgt ebenfalls in der Tabelle.

5.3.2 Ausgangsdetails

Boyenstraße - 7-geschossiges Nullemissionshaus: Außenwand – Geschossdecke

M 1:20

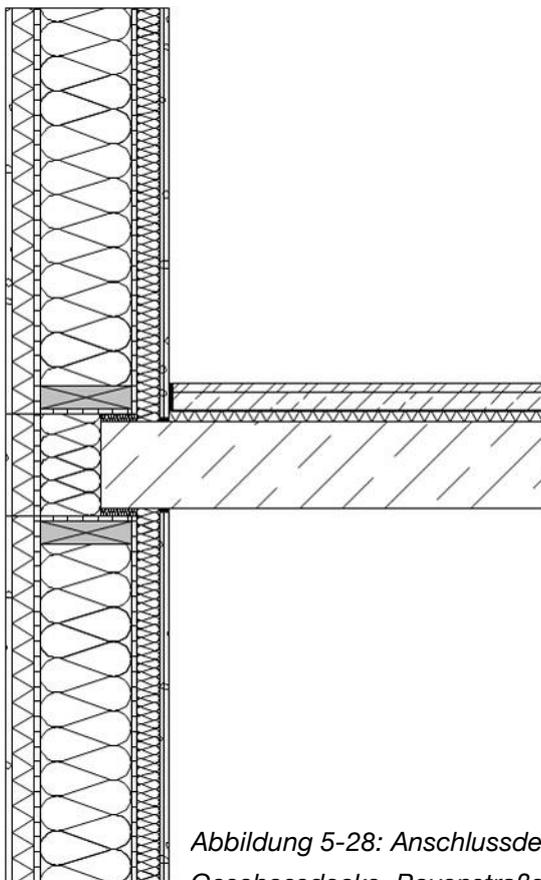


Abbildung 5-28: Anschlussdetail Außenwand-Geschossdecke, Boyenstraße (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,120 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Putz	15	1800	1,000
Holzweichfaserdämmung	60	110	0,040
HWS-Platte (MDF)	15	400	0,100
KVH/ Zellulosefüllung	240	500/ 20-60	0,040
HWS-Platte (OSB)	15	650	0,130
KVH/ Dämmung mineralisch	60	10-200	0,035
GKF-Platte	2x 12,5	900	0,250
Geschossdecke (von oben nach unten)			U-Wert: -
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag (Parkett)	22	500	0,130
Zementestrich	50	2000	1,400
Dichtungsbahn	-	-	-
TSD	30	10-35	≤ 0,040
Stahlbetondecke	230	2500	2,500

CO₂-neutrale Grundschule - Neubau: Außenwand – Geschossdecke

M 1:20

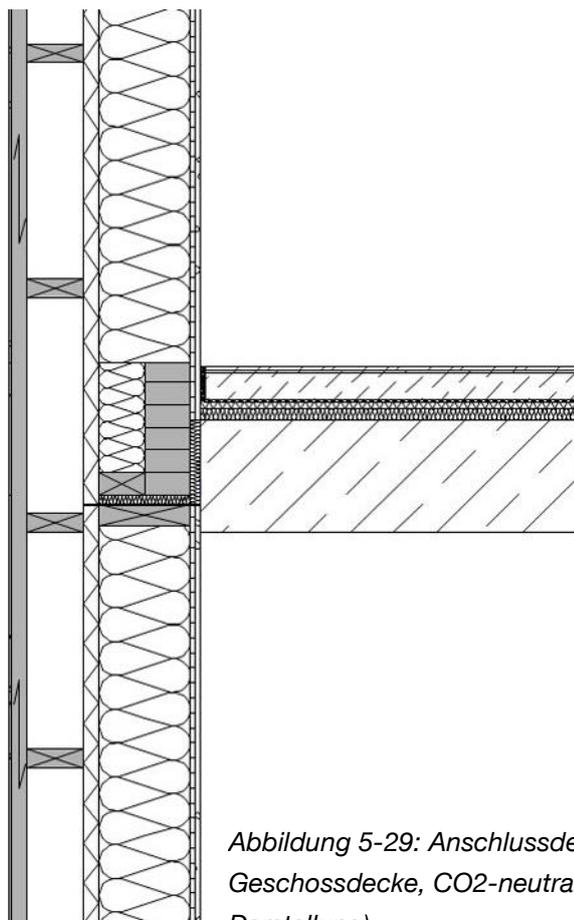


Abbildung 5-29: Anschlussdetail Außenwand-Geschossdecke, CO₂-neutrale Grundschule (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,143 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Faserzementplatte (Z-31.4-183)	8	1950	-
Vertikale Lattung	40	500	-
Horizontale Lattung	150	500	-
Holzweichfaserdämmplatte	40	110	≤ 0,040
KVH/ Steinwolledämmung	240	500/ 10-200	0,035
HWS-Platte (OSB4)	15	650	0,130
GF-Platte	12,5	1200	0,350
Geschossdecke (von oben nach unten)			U-Wert: -
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag (Fliesen)	10	2300	1,300
Dünnbettmörtel	5	2000	1,600
Zementestrich	75	2000	1,400
PE-Folie	0,2	-	-
TSD	20	10-35	≤ 0,040
Dämmung	30	≤ 200	≤ 0,040
Stahlbeton	300	2500	2,500

CO₂-neutrale Grundschule - Neubau: Außenwand – Bodenplatte

M 1:20

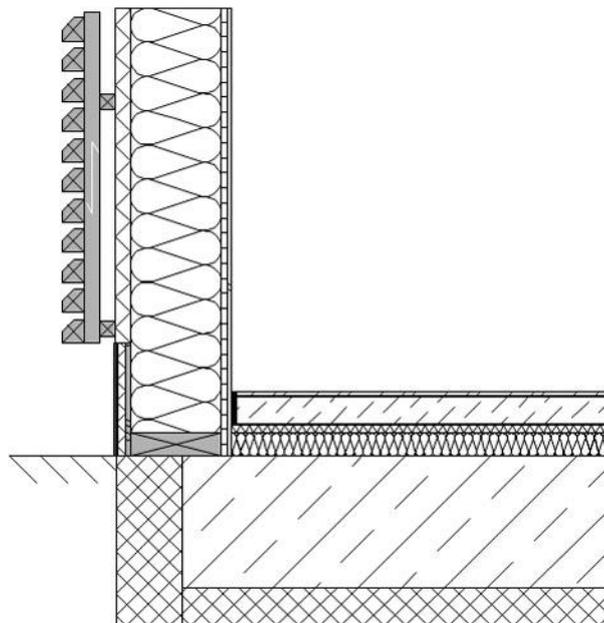


Abbildung 5-30: Anschlussdetail Außenwand-Bodenplatte, CO₂-neutrale Grundschule (Eigene Darstellung)

Außenwand Sockelbereich (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,143 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Holzlamellen	60 - 80	500	-
Vertikale Lattung	40	500	-
Horizontale Lattung	40	500	-
Unterspannbahn	-	-	-
Holzweichfaserdämmplatte	40	110	≤ 0,040
KVH/ Steinwolle	240	500/ 10-200	0,035
HWS-Platte (OSB4)	15	650	0,130
GF-Platte	12,5	1200	0,350
Bodenplatte (von oben nach unten)			U-Wert: 0,205 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag (Fliesen)	10	2300	1,300
Dünnbettmörtel	5	2000	1,600
Zementestrich	75	2000	1,400
PE-Folie	0,2	-	-
TSD	20	10-35	≤ 0,040
Wärmedämmung	60	20-65	≤ 0,040
Stahlbeton	350	2500	2,500
Perimeterdämmung	100	≤ 200	≤ 0,040

LCT One: Außenwand – Dach

M 1:20

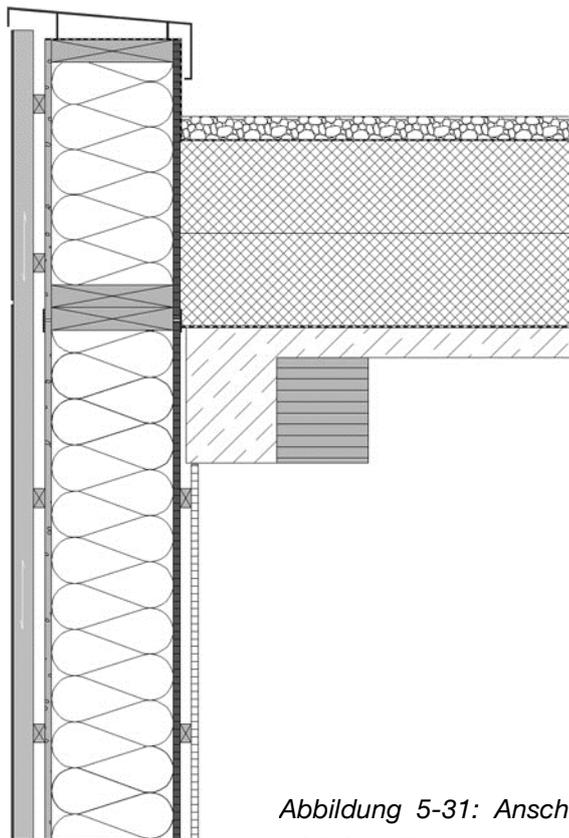


Abbildung 5-31: Anschlussdetail Außenwand-Dach,
LCT One (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,143 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Recycelte Aluminiumfassade (Z-33.2-1012)	6	1375	-
Traglattung	82	500	-
Zementgeb. Holzfaserplatte	18	1200	0,230
KVH/ Steinwolle­dämmung	320	500/ 10-200	≤ 0,040
HWS-Platte (OSB)	18	110	0,130
Lattung	30	500	0,163
Spanplatte	18	600	0,140
Dach (von oben nach unten)			U-Wert: 0,079 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Kies	50	1700-2200	-
Vlies	-	-	-
Abdichtungsbahn	-	-	-
Gefälledämmung EPS	500	10-35	0,040
Bitumenbahn	-	-	-
Stahlbeton	80	2500	2,500
BSH-Balken, 280/ 2x240 mm	280	500	0,130

LCT One: Außenwand – Geschossdecke

M 1:20

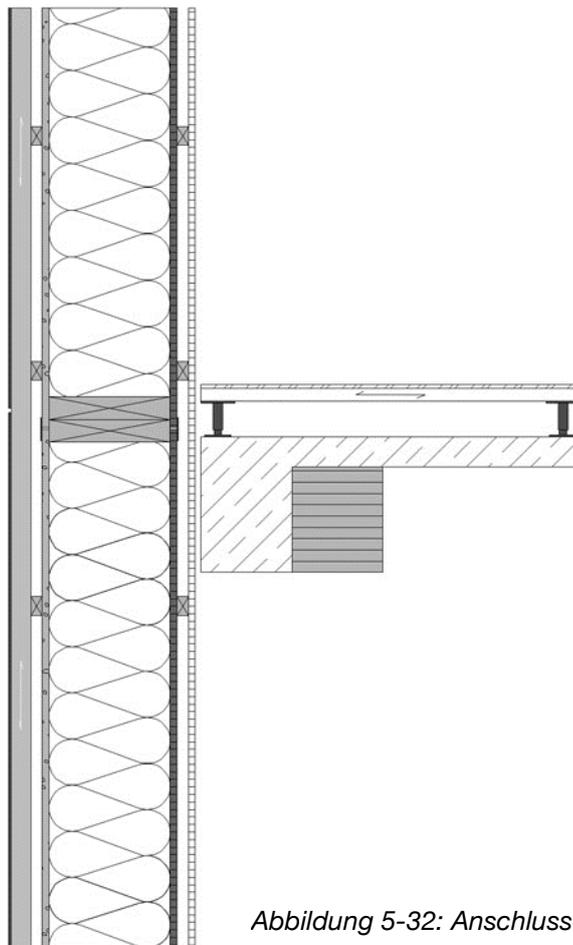


Abbildung 5-32: Anschlussdetail Außenwand-Geschossdecke, LCT One (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,143 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Recycelte Aluminiumfassade (Z-33.2-1012)	6	1375	-
Traglattung	82	500	-
Zementgeb. Holzfaserplatte	18	1200	0,230
KVH/ Steinwolleämmung	320	500/ 10-200	≤ 0,040
HWS-Platte (OSB)	18	110	0,130
Lattung	30	500	0,163
Spanplatte	18	600	0,140
Geschossdecke (von oben nach unten)			U-Wert: -
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag	10	≤ 2300	-
Hohlbodenplatte	34	≤ 60	-
Luftschicht / Unterkonstruktion	96	-	-
Stahlbeton	80	2500	2,500
BSH-Balken, 280/ 2x240 mm	280	500	0,130

„Tor zur Welt“ Bildungszentrum: Außenwand – Geschossdecke

M 1:20

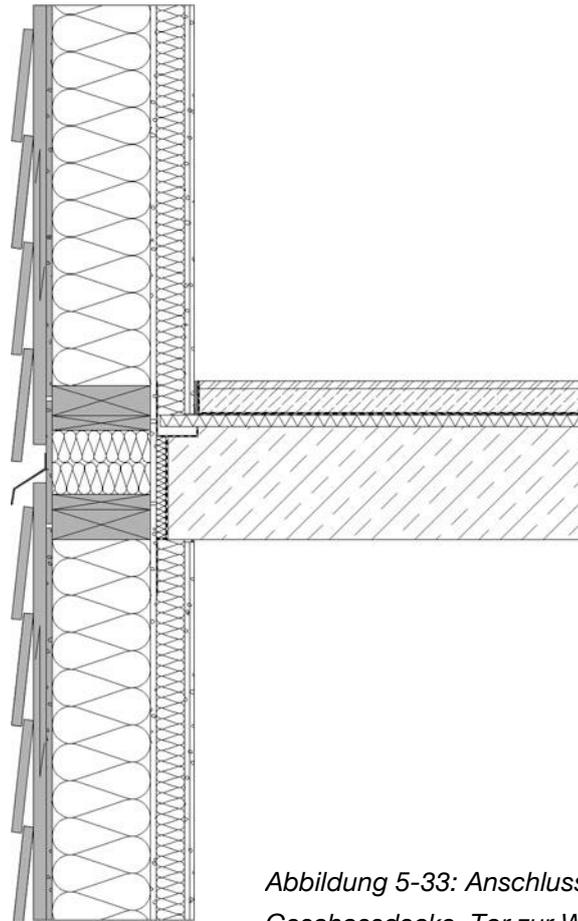


Abbildung 5-33: Anschlussdetail Außenwand-Geschossdecke, Tor zur Welt (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,123 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Stülpchalung	25	500	-
Traglattung	35	500	-
Zementgeb., glasfaserbewehrte Sandwichplatte (Z-31.1-176)	15	950	0,400
KVH/ Dämmung	260	500/ ≤ 200	0,035
PE-Folie	0,2	-	-
GF-Platte	15	1200	0,350
KVH/ Mineralwollgedämmung	75	500/ 10-200	0,035
GKF-Platte	2x 12,5	900	0,250
Geschossdecke (von oben nach unten)			U-Wert: -
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag (Parkett)	20	500	0,130
Estrich schwimmend	70	2000	1,400
PE-Folie zweilagig	0,2	-	-
TSD	30	10-35	≤ 0,040
Stahlbetondecke (Ortbeton)	300	2500	2,500

WohnSinn 2: Außenwand – Dach First / Traufe

M 1:20

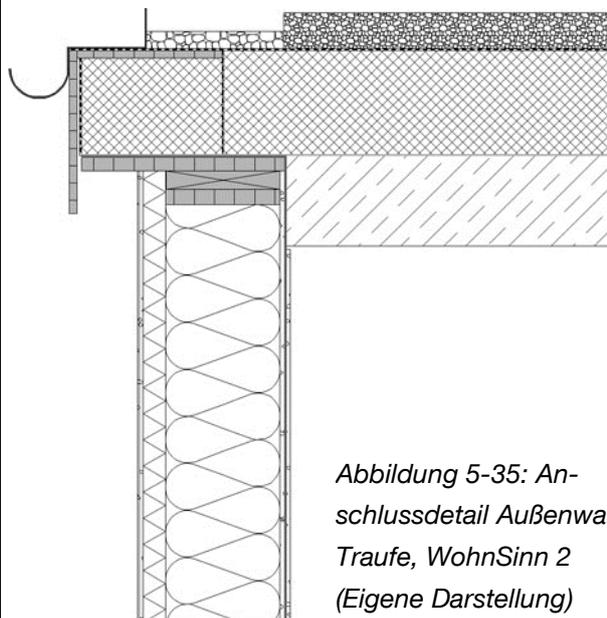


Abbildung 5-35: Anschlussdetail Außenwand-Traufe, WohnSinn 2 (Eigene Darstellung)

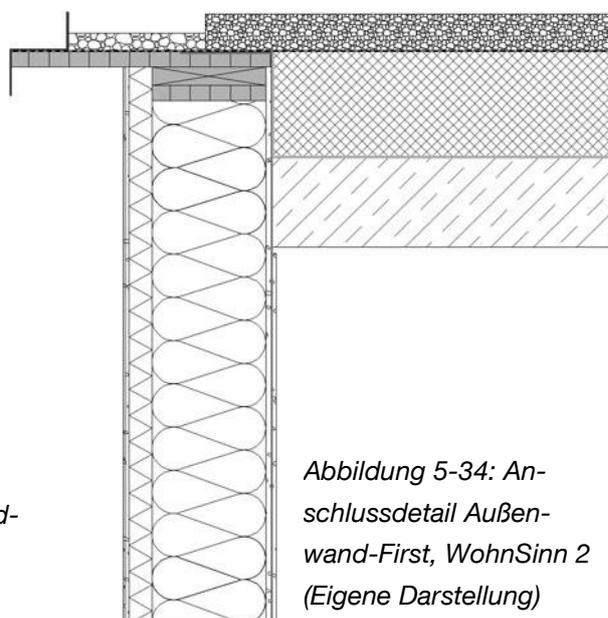


Abbildung 5-34: Anschlussdetail Außenwand-First, WohnSinn 2 (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)

**U_m-Wert:
0,123 W/m²K**

Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Putz	5	1800	1,000
Putzträgerplatte Bluclad	10	1300	0,300
Holzweichfaserplatte	60	110	≤ 0,040
LSL Z-9.1-323/ Zellulosedämmung	300	700/ 20-60	≤ 0,040
GF-Platte	15	1200	0,350
Folie (Dampfsperre)	-	-	-
GKF-Platte	12,5	900	0,250

Dach (von oben nach unten)

**U-Wert:
0,105 W/m²K**

Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Substrat	100	1700-2200	-
Dachfolie	-	-	-
PU-Dämmung	280	28-55	0,030
Dampfsperre	-	-	-
Stahlbetondach	240	2500	2,500

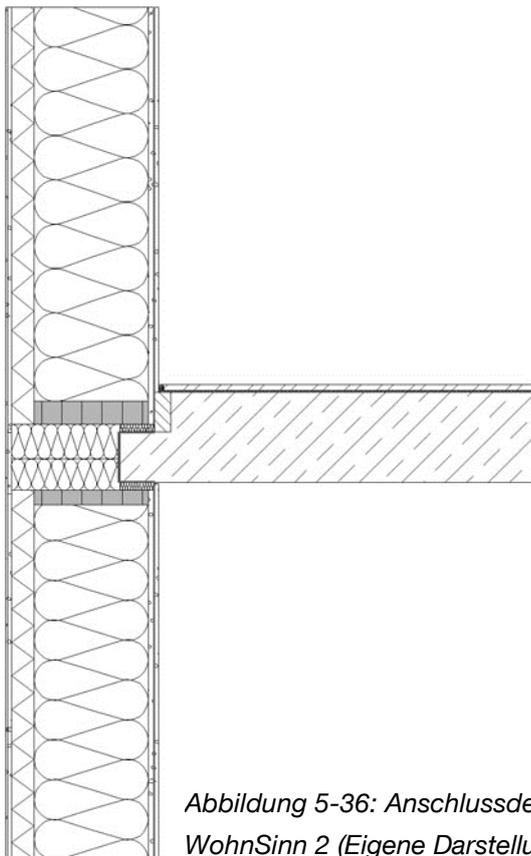
WohnSinn 2: Außenwand – Geschossdecke**M 1:20**

Abbildung 5-36: Anschlussdetail Geschossdecke,
WohnSinn 2 (Eigene Darstellung)

Außenwand (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,123 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Putz	5	1800	1,000
Putzträgerplatte Bluclad	10	1300	0,300
Holzweichfaserplatte	60	110	≤ 0,040
LSL Z-9.1-323/ Zellulosedämmung	300	700/ 20-60	≤ 0,040
GF-Platte	15	1200	0,350
Folie (Dampfsperre)	-	-	-
GKF-Platte	12,5	900	0,250
Geschossdecke (von oben nach unten)			U-Wert: -
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag	15	≤ 2300	≤ 1,300
TSD	6	10-35	≤ 0,040
Stahlbetondecke	240	2500	2,500

WohnSinn 2: Außenwand – Bodenplatte

M 1:20

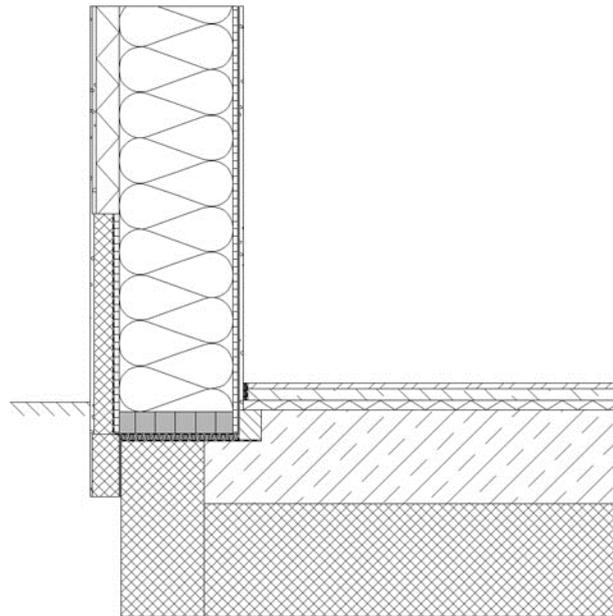


Abbildung 5-37: Anschlussdetail Außenwand-Bodenplatte, WohnSinn 2 (Eigene Darstellung)

Außenwand Sockelbereich (von außen nach innen)			U_m-Wert: 0,123 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Putz	5	1800	1,000
Putzträgerplatte Bluclad	10	1300	0,300
Holzweichfaserplatte	60	110	≤ 0,040
LSL Z-9.1-323/ Zellulosedämmung	300	700/ 20-60	≤ 0,040
GF-Platte	15	1200	0,350
Folie (Dampfsperre)	-	-	-
GKF-Platte	12,5	900	0,250
Kellerdecke (von oben nach unten)			U-Wert: 0,118 W/m²K
Baustoff	Schichtdicke [mm]	Rohdichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Fußbodenbelag	15	≤ 2300	≤ 1,300
Asphaltestrich	30	2100	0,700
TSD	25	10-35	≤ 0,040
Stahlbetonbodenplatte	250	2500	2,500
Perimeterdämmung	300	20-65	≤ 0,040

5.3.3 Variantenuntersuchung

Abbildung 5-38 veranschaulicht die Varianten der Parameterstudie zu den Wärmebrücken. Hierbei werden die vertikalen Anschlüsse Außenwand-Flachdach, Außenwand-Geschossdecke und Sockelanschluss genauer betrachtet und hinsichtlich der Einflüsse unterschiedlicher Dämmstärken, Einstellgrade und Bauteilaufbauten bewertet.

Anschluss Wand - Flachdach	Variante 1 Einfluss der Attikahöhe bei gleichbleibendem U-Wert
	Variante 2 Einfluss der Dachdämmstärke in Abhängigkeit des U-Wertes
Anschluss Wand - Geschossdecke	Variante 1 Einfluss der Stahlbeton-Deckenstärke bei gleichbleibendem U-Wert
	Variante 2 Einfluss des Einstellgrads von 33 bis 50% mit Konsole bei gleichbleibendem U-Wert
	Variante 3 Einfluss der Installationsebene in Abhängigkeit der Dämmdicke und des U-Wertes
	Variante 4 Einfluss des Entfalls der Installationsebene bei gleichbleibendem U-Wert durch Erhöhung der Gefachdämmung
	Variante 5 Einfluss der unterschiedlichen Dämmebenen bei gleichbleibendem U-Wert
	Variante 6 Einfluss des Einstellgrads von 33 bis 50% bei gleichbleibendem U-Wert und unterschiedlichen Dämmvarianten
Anschluss Wand - Bodenplatte	Variante 1 Einfluss der Stahlbeton-Bodenplattendicke in Abhängigkeit des U-Wertes
	Variante 2 Einfluss der Erhöhung der Perimeterdämmung bei konstanter Stahlbeton-Bodenplattenstärke in Abhängigkeit des U-Wertes
	Variante 3 Einfluss der Dämmlage – Gegenüberstellung Innen- und Außendämmstärken bei gleichem U-Wert

Abbildung 5-38: Varianten Parameterstudie Wärmebrücken (Eigene Darstellung)

Dabei sind Bauteiländerungen und wichtige Konstanten der Anschlussdetails (farblich) gekennzeichnet. Teilweise geben Richtungspfeile den Änderungsprozess vor. Es ist zu beachten, dass die gewählten Dämmdicken von den in der Praxis gängigen Dicken abweichen. Die marktspezifischen Dämmdicken wurden zunächst nicht berücksichtigt, da es das primäre Ziel der Variantenuntersuchungen ist, einen direkten Vergleich von unterschiedlichen Dämmlagen und Dämmdicken herzustellen und Verbesserungspotentiale quantitativ beschreiben zu können.

5.3.4 Variantenauswertung

5.3.4.1 Anschluss Wand – Flachdach

Variante 1 – Einfluss der Attikahöhe bei gleichbleibendem U-Wert am Beispiel von WohnSinn 2

Innerhalb dieser Variante wird der Einfluss der Attikahöhe a am Beispiel von WohnSinn 2 untersucht. Außenwand sowie Dach des Referenzprojektes weisen bereits einen sehr hohen energetischen Standard mit U-Werten von $0,123 \text{ W/m}^2\text{K}$ sowie $0,105 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf. Im Bereich des Dachfirstes schließt die Attika mit einer Höhe von 280 mm bündig mit der Oberkante der Dachdämmung ab (vgl. Kapitel 6.2.2). Es stellt sich demnach die Frage, ob eine Erhöhung der Attikahöhe a bei gleich bleibender Dämmung eine signifikante Verbesserung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e zur Folge hat. Grund hierfür könnte eine bessere Verteilung der Isothermen im Eckbereich des Anschlusses sein.

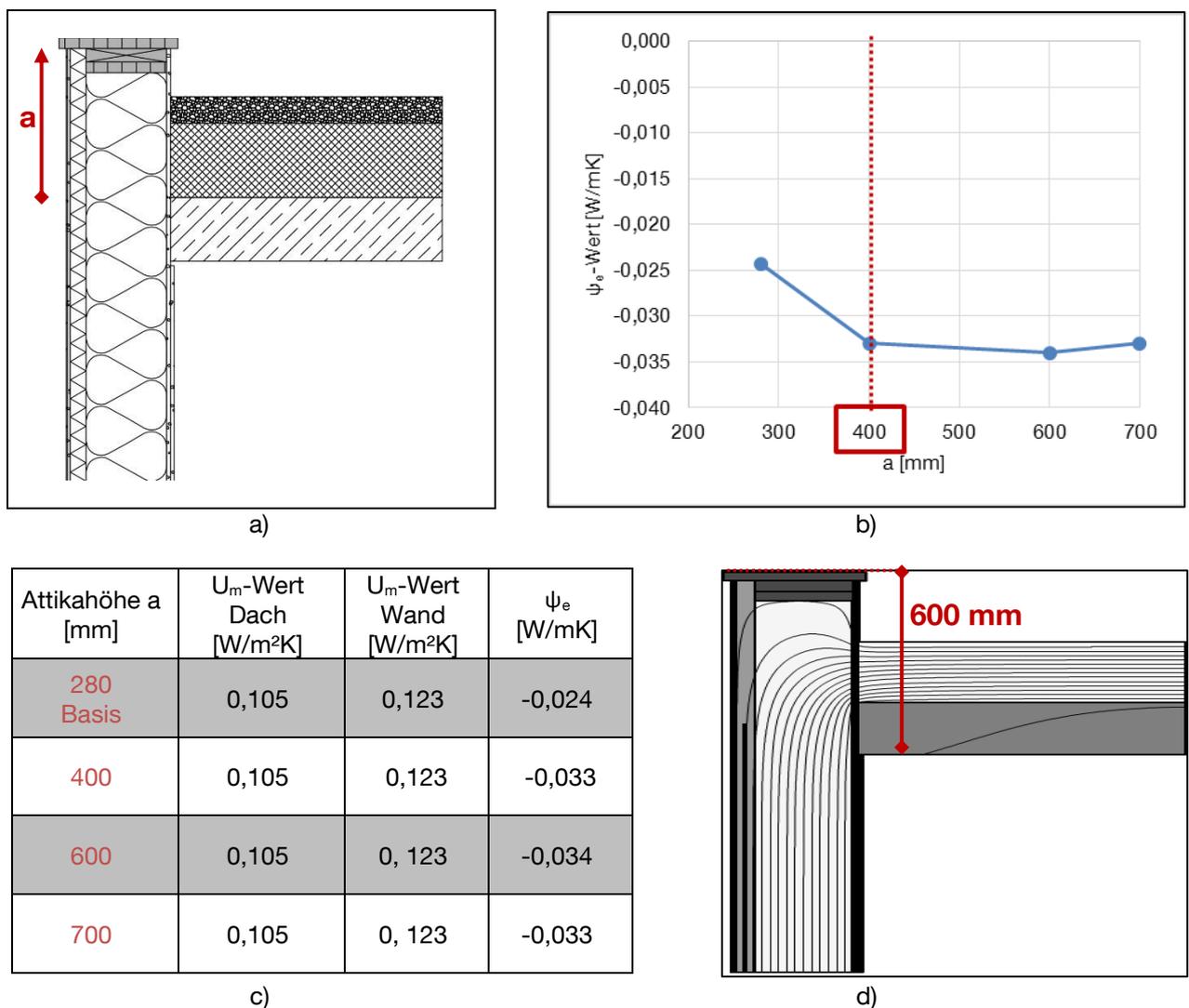


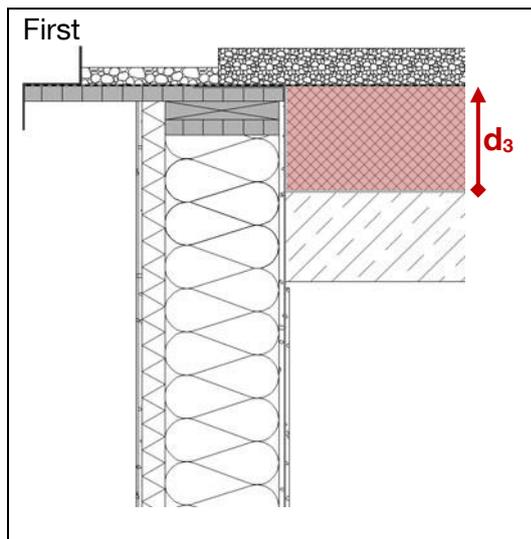
Abbildung 5-39: Parameterstudie Dach, Variante 1, WohnSinn 2, a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Attikahöhe a c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse, d) Therm-Ergebnis: Isothermen im Anschlussdetail mit einer Attikahöhe a von 600 mm (Eigene Darstellung)

Zur besseren Darstellung der Ergebnisse wurde eine Attikahöhe von bis zu 700 mm gewählt. Während eine Erhöhung der Attikahöhe von 280 auf 400 mm bei gleichbleibender Dämmung einen Sprung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e um etwa 40 % (von -0,024 auf -0,033 W/mK) zur Folge hat, so stagniert bei einer weiteren Erhöhung der Wert und bewirkt keine signifikante Verbesserung. Den Grund hierfür lässt sich sehr gut am Verlauf der Isothermen erkennen. Wie vermutet, gibt eine Erhöhung den Isothermen im Eckbereich des Anschlusses mehr Raum für eine bessere Verteilung. Unter den gegebenen Randbedingungen des Referenzprojektes scheinen die Isothermen eine ideale Verteilung bei einer Attikahöhe um die 400 mm erreicht zu haben. Eine weitere Erhöhung lässt keine Verteilungsveränderung der Isothermen und somit auch keine weitere Verbesserung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e erkennen.

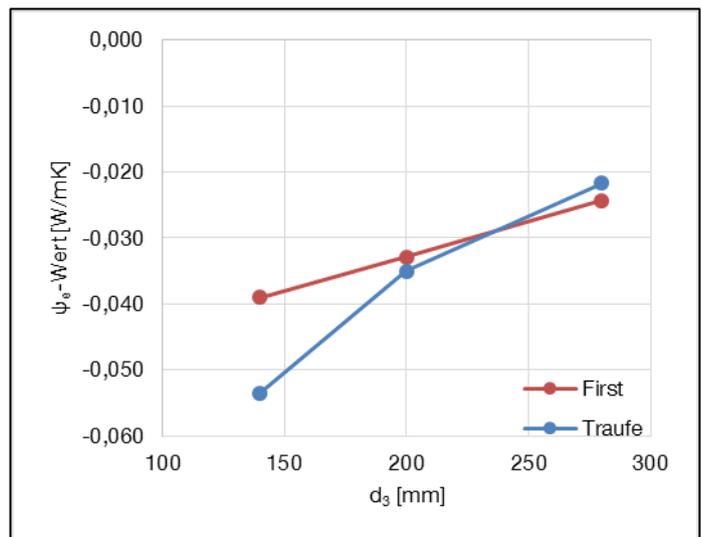
Demnach sollte die günstige Auswirkung einer erhöhten Attika unter wärmeschutztechnischem Gesichtspunkt in der Planung mit berücksichtigt werden. Insbesondere ist dabei darauf zu achten, dass die Gefachdämmung der Außenwand bis oberhalb Oberkante der Dachdämmung zu führen ist, um die Funktionalität der Wärmebrücke zu gewährleisten.

Variante 2 – Einfluss der Dachdämmstärke in Abhängigkeit des U-Wertes am Beispiel von WohnSinn 2

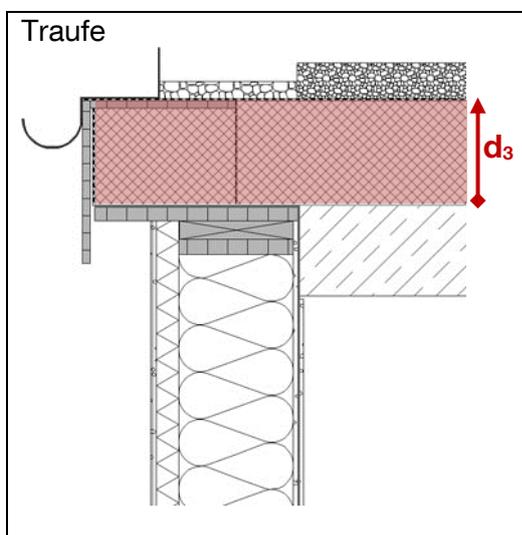
Innerhalb dieser Variante soll der Einfluss der Dämmdicke der Aufdachdämmung d_3 an den Beispielen First sowie Traufe des Referenzprojektes WohnSinn 2 untersucht werden. Das Flachdach des Referenzprojektes hat einen sehr hohen energetischen Standard (U-Wert von 0,105 W/m²K) mit einer Aufdachdämmung von 280 mm. Es stellt sich die Frage, welche Werte für ψ_e im Anschlussbereich Wand-Flachdach erreicht werden, wenn bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen die Dämmdicke der Aufdachdämmung d_3 an andere Energiestandards angepasst wird.



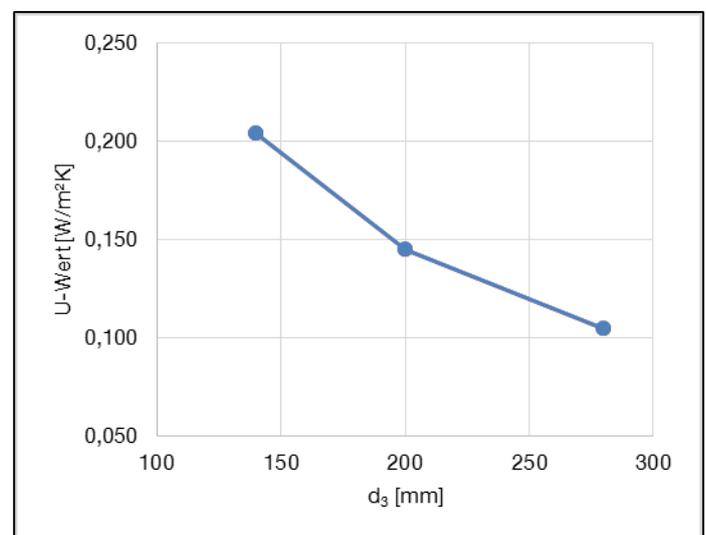
a)



b)



c)



d)

Abbildung 5-40: Parameterstudie Dach, Variante 2, WohnSinn 2

a) Anschlussdetail First, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dämmung d_3 , c) Anschlussdetail Traufe, d) Diagramm U-Wert in Abhängigkeit der Dämmung d_3 (Eigene Darstellung)

Tabelle 5-5: Parameterstudie Dach, Variante 2, WohnSinn 2, Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (Eigene Darstellung)

Dämmdicke d_3 [mm]	U_m -Wert Dach [W/m ² K]	ψ_e First [W/mK]	ψ_e Traufe [W/mK]
140	~0,200	-0,039	-0,054
200	~0,150	-0,033	-0,035
280 Basis	~0,105	-0,024	-0,022

Für die Betrachtung wurden als wärmeschutztechnische Randbedingungen des Daches neben dem Ausgangsfall (Basis) ebenfalls die Energiestandards gemäß 75 % des Referenzgebäudes der EnEV 2014 ($U_m = 0,200$ W/m²K) und Passivhaus ($U_m = 0,150$ W/m²K) untersucht. Die Dämmdicke d_3 wurde entsprechend der geforderten Randbedingung festgelegt.

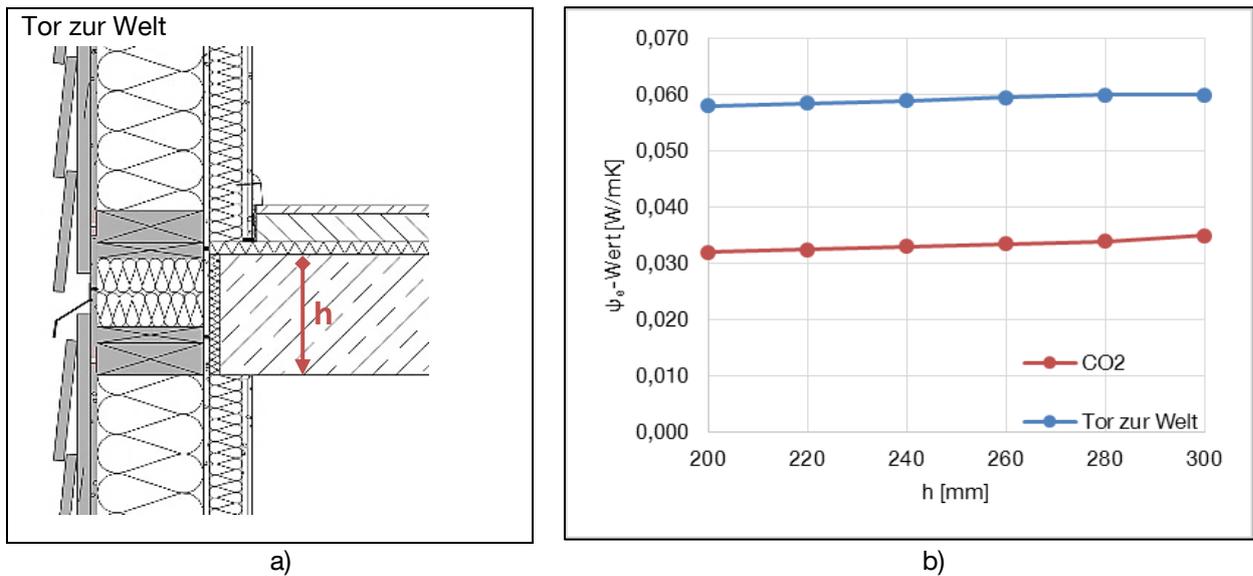
Es gilt, je besser der U-Wert des betrachteten Bauteils (hier: Dach) gewählt wurde, umso schlechter wird der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e im Bereich des Anschlussbereiches. Eine Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten um 50% bewirkt eine Verschlechterung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten, beim First um etwa 40 % sowie bei der Traufe um etwa 60 %. Hierbei ist der starke Einfluss der materiellen Abweichung im Bereich des Firsts zu erkennen. Die bis Oberkante Dachdämmung hochgezogene Außenwand ist für die schlechtere Qualität der Wärmebrücke im Firstdetail im Vergleich zum durchgezogenen Dach im Traufdetail zuständig. Der Einfluss einer sich verändernden Aufdachdämmung d_3 ist daher geringer und an einer geringeren Steigung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e zu erkennen.

Eine Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten bewirkt bei einem Dach mit einem ohnehin hohen energetischen Standard keine Verbesserung der Wärmebrücke im Anschlussbereich an die Außenwand. Demnach kann festgehalten werden, dass der größte Einfluss auf die Funktionalität einer geometrischen Wärmebrücke Abweichungen innerhalb des Regelaufbaus sind (s. Abbildung 5-41 und Tabelle 5-5).

5.3.4.2 Anschluss Wand – Geschossdecke

Variante 1 – Einfluss der Stahlbeton-Deckenstärke bei gleichbleibendem U-Wert am Beispiel der CO₂-neutralen Grundschule und dem Bildungszentrum „Tor zu Welt“

Innerhalb dieser Variante wird der Einfluss der Deckenhöhe h am Beispiel der CO₂-neutralen Grundschule und dem Bildungszentrum „Tor zu Welt“ untersucht. Die vorgestellten hochwärmegedämmten Außenwände mit Hinterlüftung weisen U-Werte von 0,143 W/m²K und 0,123 W/m²K auf. Die Decken besitzen eine Höhe $h = 300$ mm. Es ist zu klären, ob die Erhöhung der Stb.-Deckendicke bei gleichbleibendem U-Wert der vorgestellten Außenwände einen signifikanten Einfluss auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e zur Folge hat.



Deckenhöhe h [mm]	200	220	240	260	280	300 Basis
CO ₂ -neutrale Grundschule						
ψ_e [W/mK]	0,032	0,033	0,033	0,034	0,034	0,035
Tor zur Welt						
ψ_e [W/mK]	0,058	0,059	0,059	0,060	0,060	0,060

c)

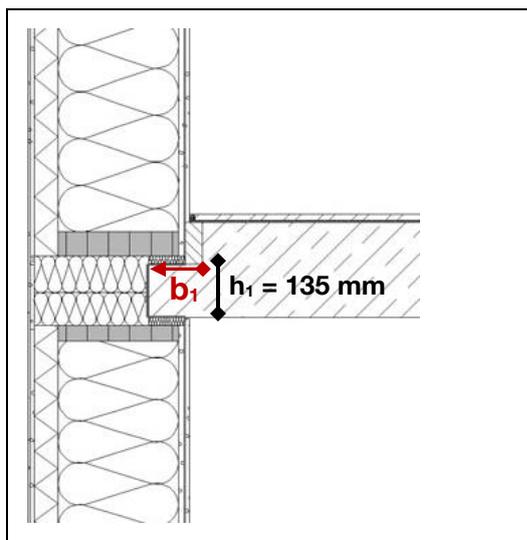
Abbildung 5-42: Parameterstudie Decke, Variante 1, CO₂-neutralen Grundschule und Tor zu Welt

a) Anschlussdetail Tor zu Welt, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Deckenhöhe h , c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (Eigene Darstellung)

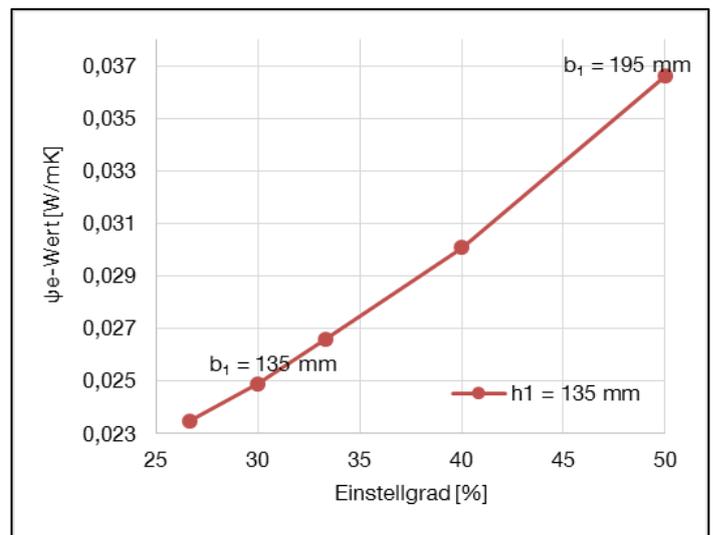
Für die Betrachtung wurde der praxisgerechte Bereich einer Deckenhöhe von 200 bis 300 mm gewählt. Generell ist davon auszugehen, dass eine Vergrößerung der sich im Anschluss befindenden Betonmasse die Wirkung der materiellen Wärmebrücke in diesem Bereich vergrößert. Der Verlauf des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e bestätigt dies, lässt jedoch gleichzeitig erkennen, dass eine Erhöhung der Deckenhöhe um 100 mm eine Verschlechterung um 0,001 W/mK – weniger als 10 % des Ausgangswertes – zur Folge hat. Der Einfluss der Wärmebrücke steigt marginal an. Demnach kann die Deckenhöhe bei hochgedämmten, vorgestellten Außenwänden nach konstruktiven bzw. planerischen Gesichtspunkten gewählt werden.

Variante 2 – Einfluss des Einstellgrads von 33 bis 50% mit Konsole bei gleichbleibendem U-Wert am Beispiel von WohnSinn 2

Innerhalb dieser Variante wird der Einfluss der Konsole am Beispiel von WohnSinn 2 untersucht. Auf der Konsole eingestellte Außenwände des Referenzprojektes weisen U-Werte im Passivhaus-Standard von 0,123 W/m²K auf. Die Decken besitzen eine Höhe h von 240 mm, Konsolen mit einer Höhe h_1 von 135 mm und einer Breite b_1 von ebenfalls 135 mm. In Variante 1 wurde der geringe Einfluss einer Volumenänderung des Betonbauteils in vertikaler Richtung dargestellt (hier: Konsolenhöhe h_1). Nun ist es von Interesse, welchen Einfluss die Wahl der Konsolenbreite b_1 bei gleichbleibendem U-Wert der eingestellten Außenwände auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e zur Folge hat.



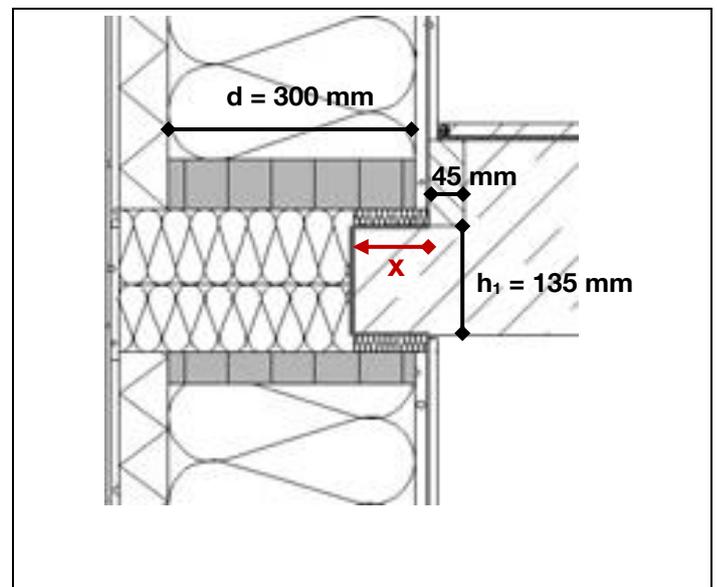
a)



b)

Einstellgrad x / d [%]	Konsolenbreite b_1 [mm]	ψ_e [W/mK]
27	125	0,024
30 Basis	135 Basis	0,025
33	145	0,027
40	165	0,030
50	195	0,037

c)



d)

Abbildung 5-43: Parameterstudie Decke, Variante 2, WohnSinn 2

a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit des Einstellgrades, c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse, d) Detail Einstellgrad (Eigene Darstellung)

Für die Betrachtung wurden Konsolenbreiten b_1 zwischen 125 und 195 mm gewählt, welche Einstellgraden innerhalb eines praxisgerechten Bereichs von etwa 25 und 50 % entsprechen.

Generell ist davon auszugehen, dass eine Vergrößerung der sich im Anschluss befindenden Betonmasse die Wirkung der geometrischen Wärmebrücke in diesem Bereich vergrößert. Im Gegensatz zur *Variante 1 – Einfluss der Stahlbeton-Deckenstärke bei gleichbleibendem U-Wert am Beispiel der CO₂-neutralen Grundschule und dem Bildungszentrum „Tor zu Welt“* bestätigt ein annähernd linearer Verlauf des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e den signifikanten Einfluss einer Erhöhung der Deckenhöhe. Der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e verschlechtert sich um fast 50 %, wechselt man von einem Einstellgrad von 30 % auf einen Einstellgrad von 50 %. Der Einfluss der materiellen Wärmebrücke steigt signifikant an.

Demnach sollte bei hochgedämmten, eingestellten Außenwänden die Decke so wenig wie möglich in der Außenhülle integriert sein. Der minimalst mögliche Einstellgrad ist gemäß konstruktiven Gesichtspunkten gegen Kippen der Außenwand zu wählen.

Variante 3 – Einfluss der Installationsebene in Abhängigkeit der Dämmdicke und des U-Wertes am Beispiel des Bildungszentrums „Tor zur Welt“

Innerhalb dieser Variante soll der Einfluss der Dämmdicke der Installationsebene bei vorgestellten Außenwänden und hinterlüfteten Fassaden untersucht werden. Die Außenwand des Referenzprojektes hat bereits einen sehr hohen energetischen Standard mit einem U-Wert von $0,123 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Dämmstärke Kernelement: 260 mm). Es stellt sich demnach die Frage, ob die Dämmdicke der Installationsebene die Ergebnisse signifikant verändert.

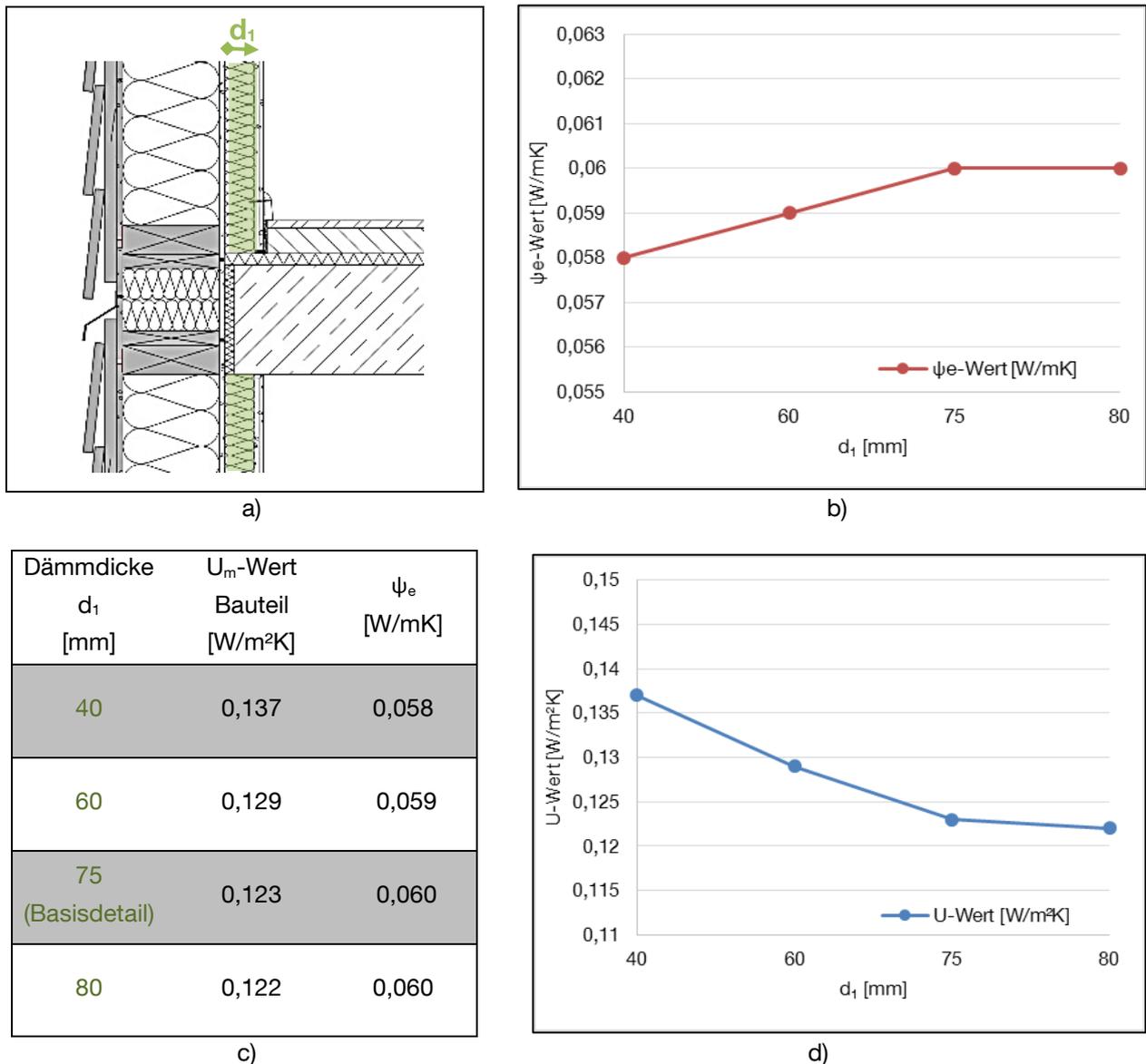


Abbildung 5-44: Parameterstudie Decke, Variante 3, Bildungszentrum „Tor zur Welt“

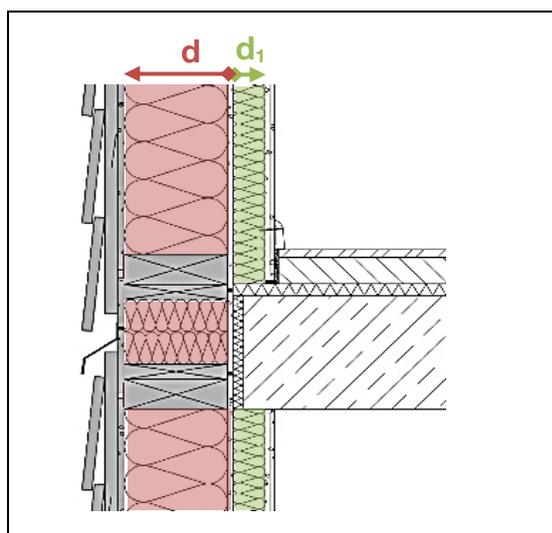
a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dämmdicke d_1 der Installationsebene, c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse, d) Diagramm U-Wert in Abhängigkeit der Dämmdicke d_1 der Installationsebene (Eigene Darstellung)

Für die Betrachtung wurde der Bereich zwischen 40 und 80 mm Dämmdicke gewählt.

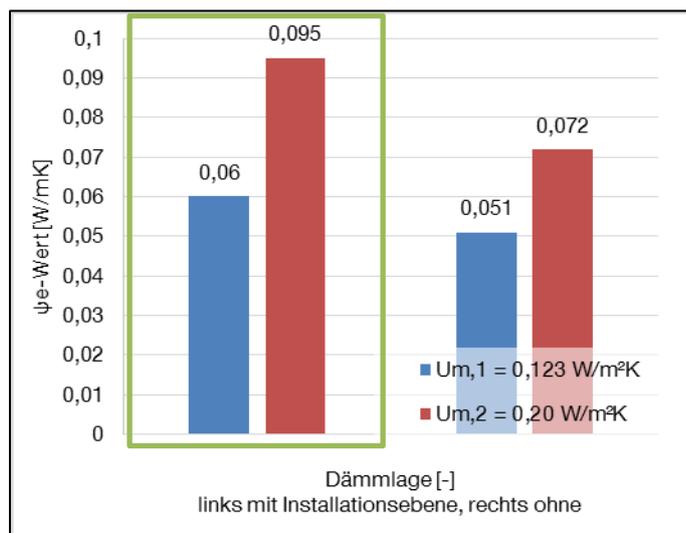
Grundsätzlich gilt bei diesem Beispiel: je besser der U-Wert der Außenwand, umso schlechter wird der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e im Bereich eines Geschossstoßes. Allerdings nimmt die Dämmdicke d_1 der Installationsebene darauf keinen signifikanten Einfluss. Bei einer Verbesserung des U_m -Wertes um 11 % (von 0,137 auf 0,122 W/m²K) verschlechtert sich ψ_e lediglich um 3,5 % (von 0,058 auf 0,060 W/mK). Demnach kann die Dämmdicke der Installationsebene bei hochgedämmten, vorgestellten Außenwänden nach konstruktiven bzw. planerischen Gesichtspunkten gewählt werden.

Variante 4 – Einfluss des Entfalls der Installationsebene bei gleichbleibendem U-Wert durch Erhöhung der Gefachdämmung am Beispiel des Bildungszentrums „Tor zur Welt“

In Variante 3 wurde der Einfluss der Installationsebene auf die Ausbildung der Wärmebrücke in Abhängigkeit des U-Wertes betrachtet. Mit dieser Variantenuntersuchung soll untersucht werden, wie sich die Wärmebrücke mit und ohne Installationsebene bei gleichbleibenden U-Wert – $U_{m,1} = 0,123$ und $U_{m,2} = 0,20$ W/m^2K – verhält. Bei $U_{m,1}$ handelt es sich um den U-Wert des Basisdetails, bei $U_{m,2}$ um einen Wert, der in der Niedrigstenergiebauweise vorzufinden ist.



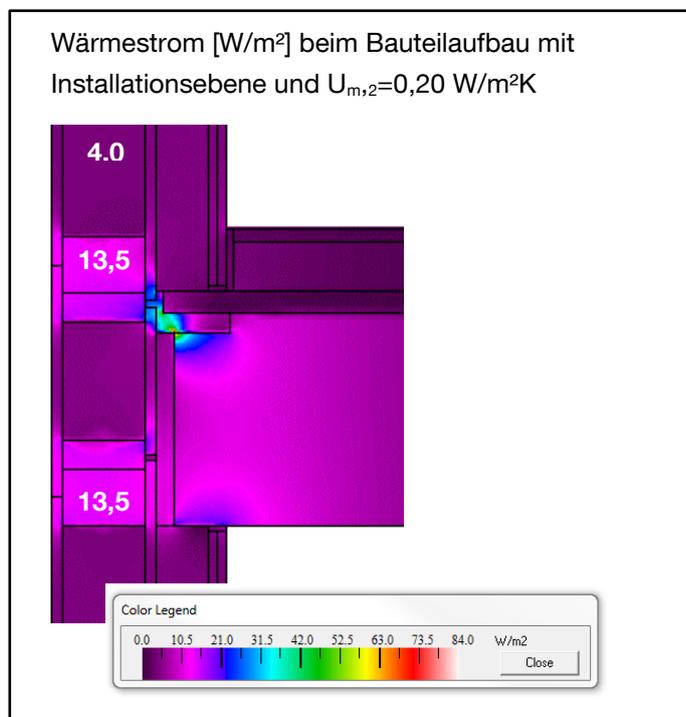
a)



b)

Bauteilaufbau	U_m -Wert Bauteil [W/m^2K]	ψ_e [W/mK]
Dämmung		
Gefach $d = 260$ mm und Installationsebene $d_1 = 75$ mm (Basisdetail)	0,123	0,060
Gefach $d = 335$ mm ohne Installationsebene	0,123	0,051
Gefach $d = 120$ mm und Installationsebene $d_1 = 75$ mm (Basisdetail)	0,20	0,095
Gefach $d = 200$ mm ohne Installationsebene	0,20	0,072

c)



d)

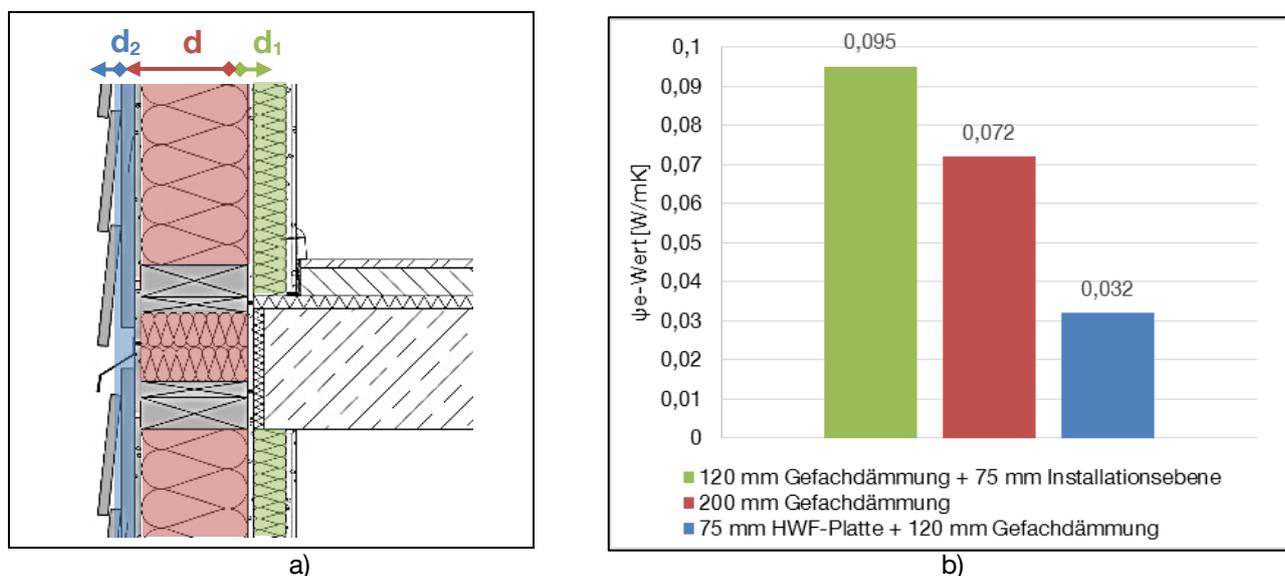
Abbildung 5-45: Parameterstudie Decke, Variante 4, Bildungszentrum „Tor zur Welt“

a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dämmlage und des U-Wertes, c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse, d) Anschlussdetail mit Darstellung des Wärmestroms beim Bauteilaufbau mit Installationsebene und $U_{m,2}$ (Eigene Darstellung)

Gemäß den Erwartungen können ohne Installationsebene bei gleichbleibendem U_m -Wert der Außenwand bessere Werte erzielt werden. Durch die Verlagerung der Dämmdicke ins Gefach wird eine durchgängigere Überdämmung der Deckeneinbindung geschaffen und die ψ_e -Werte können um 15 % (von 0,060 auf 0,051 W/mK) bzw. sogar um 24 % (von 0,095 auf 0,072 W/mK) verringert werden. Auffällig ist auch die Verschlechterung von ψ_e bei Erhöhung des U-Wertes. Zunächst widerspricht dies der bisher festgestellten Tendenz, dass sich bei schlechterem U-Wert im Verhältnis bessere ψ_e -Werte einstellen. Betrachtet man sich den Wärmestrom [W/m²] durch den Bauteilanschluss, wird allerdings der signifikante Einfluss der doppelten Lage der Konstruktionshölzer im Anschlussbereich deutlich. Hier liegt der Wärmestrom mit ca. 13,5 W/m² um das 3,3-fache höher als im Regelquerschnitt (ca. 4 W/m²). Neben dem großen Flächenanteil der KVH im Anschlussbereich begründet sich dies in der 3,7-fach höheren Wärmeleitfähigkeit der Schwellen- und Rähmhölzer im Verhältnis zu Dämmbereich. Abschließend ist also festzuhalten, dass insbesondere bei hinterlüfteten Fassaden und „schlechten“ U-Werten die Dämmdicke der Installationsebene zugunsten der Gefachdämmung möglichst gering gehalten werden sollte, um die Wärmebrückenwirkung einzudämmen.

Variante 5 – Einfluss der unterschiedlichen Dämmebenen bei gleichbleibenden U-Wert am Beispiel des Bildungszentrums „Tor zur Welt“

Die vorgestellte Außenwand des Beispielprojektes verfügt zunächst über zwei Dämmebenen – Gefachdämmung und Dämmung Installationsebene – in Kombination mit einer hinterlüfteten Fassade. Im Rahmen dieser Variante soll die quantitative Einflussnahme der einzelnen Dämmebenen auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten bei gleichbleibenden U-Wert untersucht werden. Zunächst wird die Kombination „Gefachdämmung mit Installationsebene“ in Anlehnung an das Basisdetail untersucht. Bei der zweiten Variante wird die Installationsebene entfernt und bei der dritten statt der Installationsebene ($\lambda_m = 0,044 \text{ W/mK}$) außenseitig eine HWF-Platte ($\lambda = 0,045 \text{ W/mK}$) mit gleicher Dämmdicke angebracht. Die zementgebundene, glasfaserbewehrte Sandwichplatte rückt dabei nach außen. Die anderen Schichten des Bauteils werden wie im Basisdetail angenommen.



Bauteilaufbau	U_m -Wert Bauteil [W/m ² K]	ψ_e [W/mK]
Gefachdämmung d mit Installationsebene d_1	0,203	0,095
Gefachdämmung d	0,198	0,072
Gefachdämmung d und HWF-Platte d_2	0,201	0,032

c)

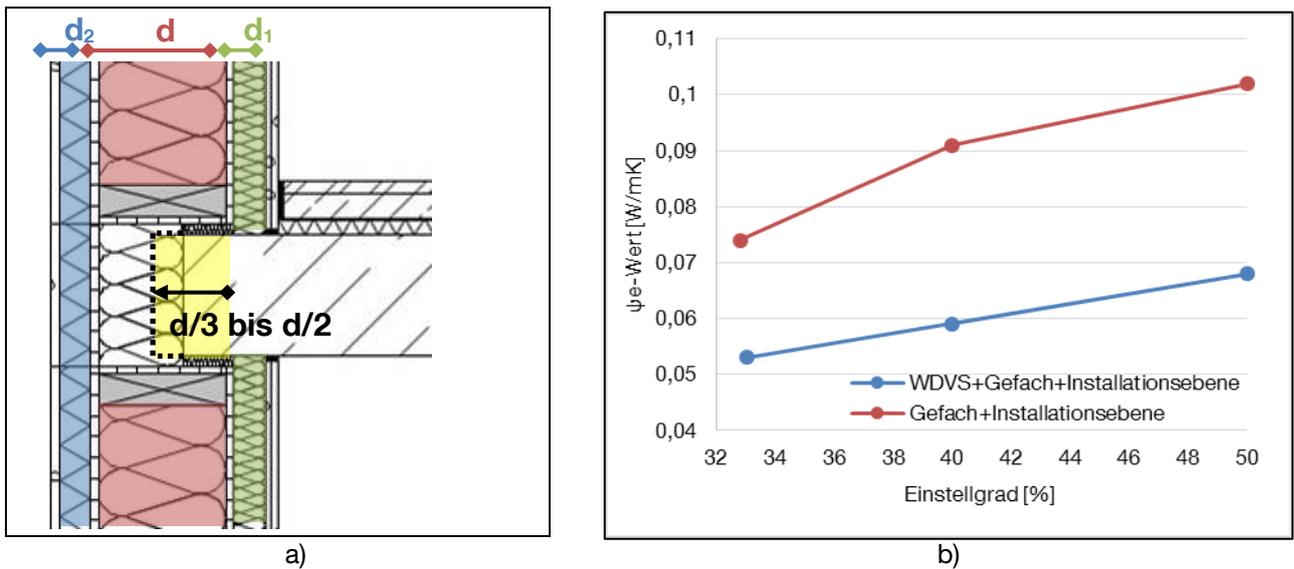
Abbildung 5-46: Parameterstudie Decke, Variante 5, Bildungszentrum „Tor zur Welt“

a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dämmlage bei gleichbleibendem U-Wert, c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (Eigene Darstellung)

Bei annähernd gleichem U-Wert (konstruktionsbedingte maximale Abweichung von 2,5 %) zeigt sich wie schon in Variante 4, dass sich die Dämmlage erheblich auf die Wärmebrücke auswirkt. Der gemittelte U_m -Wert der Außenwand bei der Variante „Gefachdämmung mit Installationsebene“ weicht von der Variante „Gefachdämmung und HWF-Platte“ lediglich um 1 % ab, der ψ_e -Wert verschlechtert sich allerdings von 0,032 W/mK um das 3-fache auf 0,095 W/mK. Offensichtlich wirkt sich die zusätzliche und vollflächige Überdämmung des Konstruktionsanschlusses sehr positiv auf den Wärmeschutz aus.

Variante 6 – Einfluss des Einstellgrads von 33 bis 50% bei gleichbleibendem U-Wert und unterschiedlichen Dämmvarianten am Beispiel der Boyenstraße

Beim Projekt Boyenstraße kam eine eingestellte Fassadenkonstruktion mit WDVS zur Ausführung. In dieser Variantenuntersuchung soll nun der Einfluss des Einstellgrads in Abhängigkeit der Dämmlagen betrachtet werden. Für die Vergleichbarkeit wird für die insgesamt sechs Varianten der U-Wert des Gefachbereichs analog zum Basisdetail mit 0,102 W/m²K festgelegt. Die gemittelten Werte U_m ergeben sich aus dem Anteil der Konstruktionsvollhölzer.



Bauteilaufbau	U_m -Wert Bauteil [W/m²K]	ψ_e [W/m²K]
WDVS-Dämmung $d_2= 60$ mm + Gefachdämmung $d= 240$ mm + Dämmung Installationsebene $d_1= 60$ mm, Einstellgrad 33%	0,117	0,053
WDVS-Dämmung $d_2= 60$ mm + Gefachdämmung $d= 240$ mm + Dämmung Installationsebene $d_1= 60$ mm, Einstellgrad 40%	0,117	0,059
WDVS-Dämmung $d_2= 60$ mm + Gefachdämmung $d= 240$ mm + Dämmung Installationsebene $d_1= 60$ mm, Einstellgrad 50%	0,117	0,068
Gefachdämmung $d= 305$ mm + Dämmung Installationsebene $d_1= 60$ mm, Einstellgrad 33%	0,122	0,074
Gefachdämmung $d= 305$ mm + Dämmung Installationsebene $d_1= 60$ mm, Einstellgrad 40%	0,122	0,091
Gefachdämmung $d= 305$ mm + Dämmung Installationsebene $d_1= 60$ mm, Einstellgrad 50%	0,122	0,102

c)

Abbildung 5-47: Parameterstudie Decke, Variante 6, Boyenstraße

a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dämmlage und des Einstellgrades, c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (Eigene Darstellung)

Im Diagramm sind die Varianten mit und ohne WDVS dargestellt. Der Einstellgrad ist auf die Gefachdicke d bezogen und variiert zwischen 33 % und 50 % ($d/3$ bis $d/2$). Dieser Bereich wird als statisch sinnvoll angesehen. Wie die Dämmlage hat auch der Einstellgrad einen erheblichen Einfluss auf die Wärmebrücke. Ohne WDVS verschlechtert sich der U-Wert bei einem Einstellgrad von 33 % auf 50 % um 38 % (0,074 W/mK; 0,102 W/mK). Der Einfluss des Einstellgrades kann allerdings durch die flächige Überdämmung mittels eines WDVS abgeschwächt werden. Mit WDVS verschlechtert sich ψ_e maximal um 28 % (0,053 W/mK auf 0,068 W/mK). Aus dieser Variantenuntersuchung resultiert die Erkenntnis, dass eingestellte Fasadenskonstruktionen mit WDVS ausgeführt werden sollten.

5.3.4.3 Anschluss Wand – Bodenplatte

Variante 1 – Einfluss der Stahlbeton-Bodenplattendicke in Abhängigkeit des U-Wertes am Beispiel der CO₂-neutralen Grundschule und von WohnSinn 2

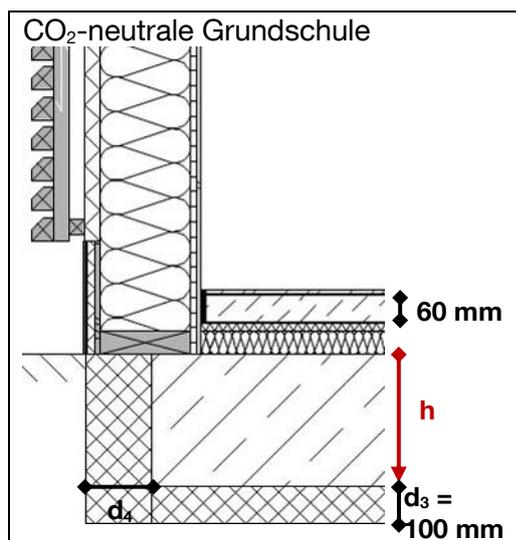
Innerhalb dieser Variante wird der Einfluss der Bodenplattendicke h am Beispiel der CO₂-neutralen Grundschule und von WohnSinn 2 untersucht. Die Referenzprojekte weisen U-Werte hochwärmegedämmter Außenwände mit Hinterlüftung von 0,143 W/m²K sowie mit einem WDVS von 0,123 W/m²K auf. Die Bodenplatten weisen Dicken von 350 bzw. 250 mm sowie eine untere horizontale Dämmdicke von 100 bzw. 300 mm auf. Es ist von Interesse, ob die Wahl der Bodenplattendicke h einen signifikanten Einfluss auf den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e zur Folge hat. Für die Betrachtung wurde der praxisgerechte Bereich zwischen 250 und 600 mm Bodenplattendicke gewählt.

Im Gegensatz zur Variante 1 des Anschlusses Wand – Geschossdecke ist für den Anschluss Wand – Bodenplatte kein stagnierender sondern ein steigender, nahezu linearer Verlauf des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e bei gleichzeitigem Anstieg der Bodenplattendicke h zu beobachten. Hierbei ist eine Verschlechterung der Wärmebrücke von etwa 0,014 W/mK je 100 mm Betondicke zu vermerken. Die Auswertungen der beiden Referenzprojekte weisen einen nahezu parallelen Verlauf auf.

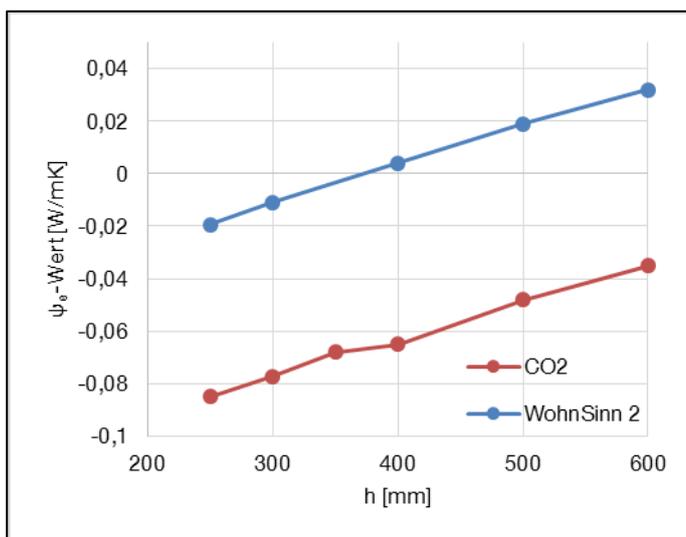
Die Ergebnisse stellen den zu berücksichtigenden Einfluss der sich vergrößernden Betonmasse auf die hier vorliegende geometrische Wärmebrücke – im Vergleich zu einer materiellen Wärmebrücke (vgl. Kapitel 5.3.4.2) – dar. Mit steigender Betonmasse wird mehr Wärme über die Bodenplatte nach außen geleitet; der Einfluss der Wärmebrücke verstärkt sich.

Um diesen Effekt auszugleichen ist bei Erhöhung der Bodenplattendicke h eine gleichzeitige Erhöhung der vertikalen Parameterdämmung d_4 zu berücksichtigen. Im Falle des Sockeldetails von WohnSinn 2 ist zu erkennen, dass die außenliegende vertikale Perimeterdämmung mit der Unterkante der horizontalen Perimeterdämmung – unterhalb der Bodenplatte – abzuschließen ist.

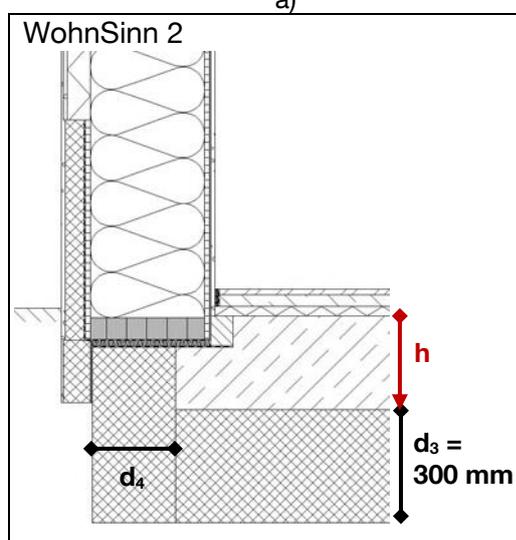
Ein optimaler Anschluss wird so ausgeführt, dass der U-Wert der Betonplatte und der Perimeterdämmung auf die Wanddicke bezogen den gleichen U-Wert wie die Wand besitzt. Eine Verbreiterung der Perimeterdämmung über die Außenkante der Wand hinaus ist allerdings nicht praxistauglich. Eine weitere Lösung wäre daher eine Perimeterdämmung mit einer besseren Wärmeleitstufe (WLS).



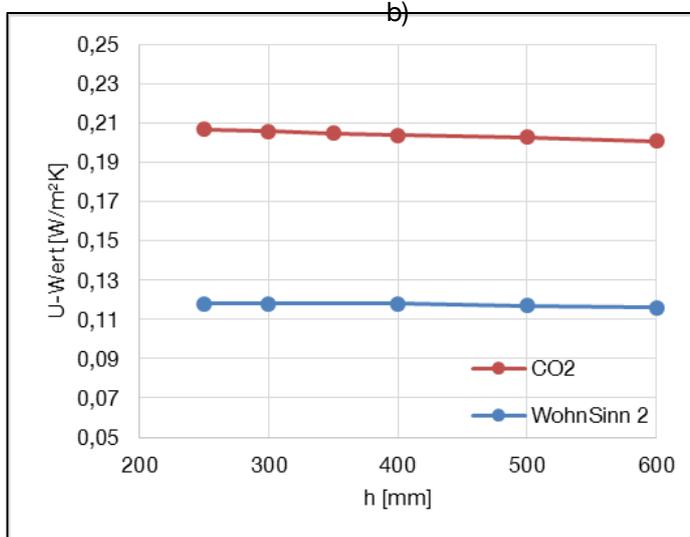
a)



b)



c)



d)

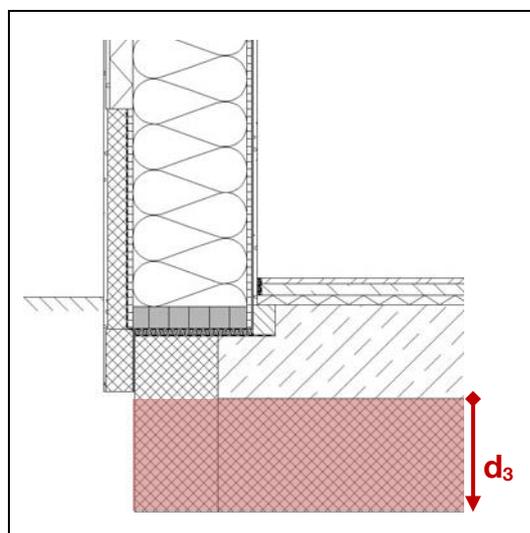
Bodenplatte h [mm]	250	300	350	400	500	600
CO₂-neutrale Grundschule						
ψ_e [W/mK]	-0,085	-0,078	-0,068 Basis	-0,065	-0,048	-0,035
U _m -Wert Bodenplatte [W/m²K]	0,207	0,206	0,205 Basis	0,204	0,203	0,201
WohnSinn 2						
ψ_e [W/mK]	-0,019 Basis	-0,011	-	0,004	0,019	0,032
U _m -Wert Bodenplatte [W/m²K]	0,118 Basis	0,118	-	0,118	0,117	0,116

e)

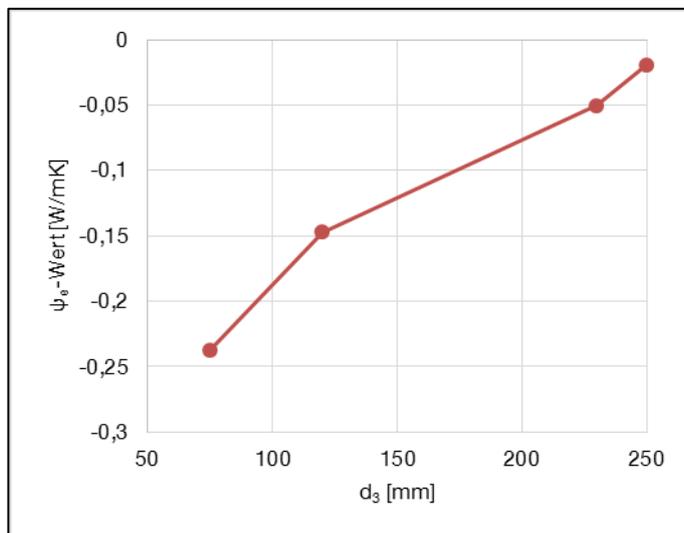
Abbildung 5-48: Parameterstudie Bodenplatte, Variante 1, CO₂-neutralen Grundschule und WohnSinn 2
 a) Anschlussdetail CO₂-neutralen Grundschule, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Bodenplattendicke h, c) Anschlussdetail WohnSinn 2, d) Diagramm U-Wert in Abhängigkeit der Bodenplattendicke h, e) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (Eigene Darstellung)

Variante 2 – Einfluss der Erhöhung der Perimeterdämmung bei konstanter Stahlbeton-Bodenplattenstärke in Abhängigkeit des U-Wertes am Beispiel von WohnSinn 2

Innerhalb dieser Variante soll der Einfluss der Dämmdicke der Perimeterdämmung d_3 unterhalb der Bodenplatte am Beispiel des Referenzprojektes WohnSinn 2 untersucht werden.



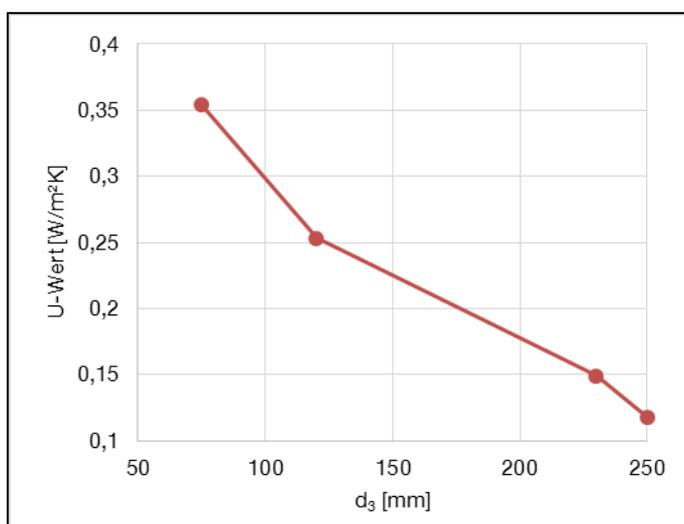
a)



b)

Dämmdicke d_3 [mm]	U_m -Wert Bodenplatte [W/m ² K]	ψ_e [W/mK]
75	~0,350	-0,237
120	~0,260	-0,147
230	~0,150	-0,050
250 Basis	0,118	-0,019

c)



d)

Abbildung 5-49: Parameterstudie Bodenplatte, Variante 2, WohnSinn 2

a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dämmung d_3 , c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse, d) Diagramm U-Wert in Abhängigkeit der Dämmung d_3 (Eigene Darstellung)

Die Bodenplatte des Referenzprojektes weist einen U-Wert von 0,118 W/m²K mit einer Perimeterdämmung von 250 mm auf. Es stellt sich die Frage, welche Werte des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e für den Anschlussbereich Wand-Sockel erreicht werden, wenn bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen die Dicke der Perimeterdämmung d_3 an andere Energiestandards angepasst wird.

Für die Betrachtung wurden als wärmeschutztechnische Randbedingungen der Bodenplatte neben dem Ausgangsfall (Basis) ebenfalls die Energiestandards gemäß Referenzgebäude der EnEV 2014

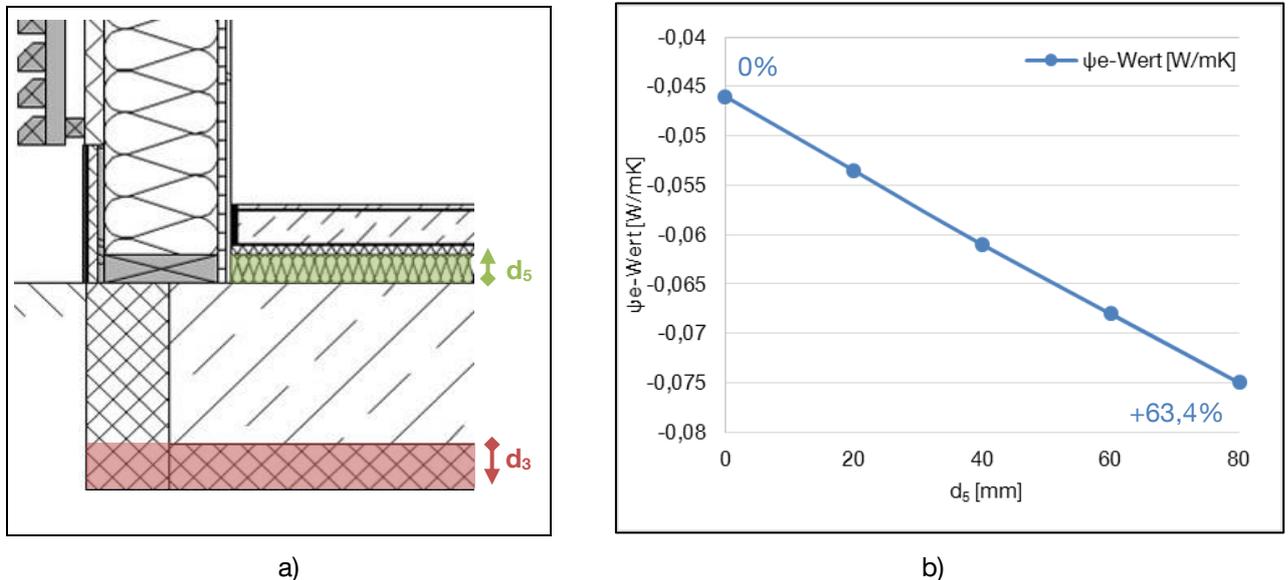
($U_m = 0,350 \text{ W/m}^2\text{K}$), gemäß 75 % des Referenzgebäudes der EnEV 2014 ($U_m = 0,260 \text{ W/m}^2\text{K}$) und Passivhaus ($U_m = 0,150 \text{ W/m}^2\text{K}$) untersucht. Die Dämmdicke d_3 wurde entsprechend der geforderten Randbedingung festgelegt.

Es gilt, je besser der U-Wert des betrachteten Bauteils (hier: Bodenplatte) gewählt wurde, umso schlechter wird der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e im Bereich des Anschlussbereiches. Eine Halbierung des Wärmedurchgangskoeffizienten bewirkt eine Verschlechterung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten um fast 80 %.

Eine Anhebung des Energiestandards einer Bodenplatte hohen Energiestandards bewirkt – wie im Falle des Flachdaches in Kapitel 5.3.4.1 – keine Verbesserung der Wärmebrücke im Anschlussbereich an die Außenwand. Demnach kann festgehalten werden, dass der größte Einfluss auf die Funktionalität einer geometrischen Wärmebrücke Abweichungen innerhalb des Regelaufbaus sind (s. Bodenplatte Variante 1).

Variante 3 – Einfluss der Dämmlage – Gegenüberstellung Innen- und Außendämmstärken bei gleichem U- Wert am Beispiel der CO₂-neutralen Grundschule

Die Bodenplatten werden oftmals innen und außen gedämmt, so auch beim Beispielprojekt (TSD 20 mm/ Wärmedämmung 60 mm/ Perimeterdämmung 100 mm). Im Folgenden sollen ausgehend vom Basisdetail die ψ_e -Werte unterschiedlicher Innen- und Außendämmstärken der Bodenplatte gegenübergestellt werden.



Bauteilaufbau	U _m -Wert Bauteil [W/m ² K]	ψ_e [W/mK]
Perimeter- d ₃ = 80 mm und Innendämmung d ₅ = 80 mm	0,205	-0,075
Perimeter- d ₃ = 100 mm und Innendämmung d ₅ = 60 mm (Basisdetail)	0,205	-0,068
Perimeter- d ₃ = 120 mm und Innendämmung d ₅ = 40 mm	0,205	-0,061
Perimeter- d ₃ = 140 mm und Innendämmung d ₅ = 20 mm	0,205	-0,054
Perimeter- d ₃ = 160 mm, Innendämmung entfällt	0,205	-0,046

c)

Abbildung 5-50: Parameterstudie Sockel, Variante 3, CO₂-neutrale Grundschule

a) Anschlussdetail, b) Diagramm außenmaßbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung d₅, c) Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (Eigene Darstellung)

Aufgrund des nach Norm festgelegten Außenmaßbezuges stellt sich beim Sockelanschluss ein negativer ψ_e -Wert ein. Je größer dieser ist, umso geringer ist der Wärmebrückeneinfluss. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die lineare Verschiebung der Dämmung zum Innenraum hin bei gleichbleibendem U-Wert mit einer linearen Verbesserung des ψ_e -Wertes einhergeht. Teilt man die Dämmdicke zur Hälfte in Innen- und Außendämmung auf, kann man so den Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e signifikant um 63 % (von - 0,046 W/mK auf -0,075 W/mK) verbessern. Grundsätzlich sind auch bei Innendämmungen große Dämmdicken möglich. Allerdings müssen diese eine hohe Druckfestigkeit aufweisen, um die Tragfähigkeitsanforderungen zu erfüllen. Zudem führt die dementsprechend hohe dynamische Steifigkeit der Dämmung zur Verschlechterung des Schallschutzes. Eine Trittschalldämmung ist bei erhöhten Schallschutzanforderungen stets zu berücksichtigen. Demnach sind aktuelle Zulassungen der Hersteller zu befolgen. Ebenfalls ist bei der Ausführung von Innendämmungen besonders auf den Feuchteverlauf im Bauteil zu achten, während die Horizontalsperren gegen Bodenfeuchte nach DIN 18195-4:2011-12 auszuführen sind.

5.3.5 Ableitung von Konstruktionsregeln

Neben den Ausführungs- und Planungsbeispielen nach DIN 4108 Beiblatt 2 sollten folgende Konstruktionsregeln zur Verminderung von Wärmebrückenwirkungen bei der Hybridbauweise berücksichtigt werden.

Allgemein:

- Eine Erhöhung der Dicken wärmedämmender Schichten von Dächern und Bodenplatten hoher Energiestandards bewirkt keine Verbesserung der Wärmebrücke im Anschlussbereich.
- Grundsätzlich sollten die Abweichungen vom Regelaufbau so gering wie möglich gehalten werden. Das bedeutet, dass einbindende Bauteile durch geeignete Maßnahmen den gleichen Wärmeschutz aufweisen sollten, wie die wärmeübertragende Umfassungsfläche.
- WDVS gewährleisten eine durchlaufende Überdämmung in Anschlussbereichen und bewirken eine Verringerung der Wärmebrückenwirkung.
- Um die Wärmebrückenwirkung und die Gefahr von Tauwasserausfall im Bauteilinneren gering zu halten, sollten nicht mehr als 20% der Gesamtdämmstärke auf der zum Innenraum gerichteten Seite der Luftdichtheitsebene – also in der Installationsebene – liegen. (Informationsdienst Holz R01 T 03 F10, 2002)

Attikaanschluss:

- Eine erhöhte Attika wirkt sich günstig auf den Wärmeschutz aus. Die Gefachdämmung der Außenwand sollte mindestens bis zur Oberkante der Dachdämmung führen.

Deckenanschluss:

- Ist eine Installationsebene erforderlich, sollte die Dicke der Gefachdämmung nicht direkt zugunsten der Dämmdicke der Installationsebene verringert werden. Die negative Wärmebrückenwirkung stellt sich vor allem bei der eingestellten Fassadenkonstruktion ein.
- Besonders bei hinterlüfteten Fassaden ist die Dämmdicke der Installationsebene möglichst gering zu halten.
- Bei vorgestellten Fassaden, deren Lastabtrag über den Fußpunkt erfolgt, sollten Elementstöße nach Möglichkeit nicht in Deckenhöhe verlaufen.
- Im Gegensatz zur Deckenhöhe hat der Einstellgrad der Fassade einen signifikanten Einfluss auf die Wärmebrückenausbildung. Der minimalst mögliche Einstellgrad ist gemäß konstruktiven Gesichtspunkten gegen Kippen der Außenwand zu wählen.

Sockelanschluss:

- Aus Sicht der Wärmebrückenwirkung sind Innendämmungen bei Bodenplatten besonders vorteilhaft. Bei der Ausführung müssen besonders der Feuchteschutz, Schallschutz und die nach Hersteller zulässigen Dämmdicken beachtet werden.
- Die seitliche Perimeterdämmung ist stets bis zur UK der Bodenplatte bzw. der horizontalen Perimeterdämmung zu führen. Um die Wärmebrückenwirkung gering zu halten, kann die WLS der seitlichen Dämmung über den Standard hinaus erhöht werden.

5.4 Schallschutz

5.4.1 Versuchsserie Flankenschalldämmung

Im Rahmen von Schallprüfungen wurde die Flankenschalldämmung von Außenwänden in Holzständerbauweise in horizontaler und vertikaler Richtung zum Einsatz in Hybridbauten überprüft. Eine Untersuchung der Schalldämmung gegen Außenlärm war nicht Gegenstand der Untersuchungen, hierfür wird auf weiterführende Literatur (Scholl, W.; Bietz, H, 2005) oder Regelwerke (DIN 4109-33, 2016) verwiesen. Eine Übersicht über den Probekörper und die geprüften Varianten gibt Tabelle 5-6.

Tabelle 5-6: Beschreibung Außenwandkonstruktion und Anbindung an das Trennbauteil

Variante	Konstruktion
Grundwand	15 mm Holzwerkstoffplatte DHF 60/140 mm Holzständer mit Mineralfaserdämmstoff 15 mm Holzwerkstoffplatte P7
Vorsatzschale	Optional direkt montiert oder freistehend mit 1 oder 2 Lagen 12,5 mm GKB
Stoßstelle	Außenwand vorgestellt oder eingestellt
Ausführung Fuge zum Trennbauteil	Vollvolumig ausgefüllt mit Mineralfaserdämmstoff, optional beidseitige Abdichtung mit Multifunktionsband oder plastischem Dichtstoff

Die detaillierten Ergebnisse der Studie sind dem detaillierten Projektbericht zu entnehmen (U-Nr. 14-001534-PR01, 2015). Eine Übersicht über die erreichten und abgeprüften Werte der Flankenschalldämmung $D_{n,f,w}(C; C_{tr})$ ist der Tabelle 5-7 zu entnehmen.

Tabelle 5-7: Flankenschalldämmung von Außenwandkonstruktionen für Gebäude in Hybridbauweise, geprüfte Werte ¹⁾ mit Vorsatzschale, ²⁾ ohne Vorsatzschale (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

Variante	Übertragungsrichtung		
	horizontal	vertikal	
Ausbildung Stoßstelle Außenwand	Vorgestellt	Von $D_{n,f,w}(C; C_{tr}) = 47 (-1; -3) \text{ dB bis } 71 (-3; -9) \text{ dB}^{1)}$	Von $D_{n,f,w}(C; C_{tr}) = 44 (-1; -3) \text{ dB bis } 69 (-1; -6) \text{ dB}^{1)}$
	Eingestellt	Von $D_{n,f,w}(C; C_{tr}) = 52 (-1; -4) \text{ dB bis } 69 (-3; -10) \text{ dB}^{2)}$	Von $D_{n,f,w}(C; C_{tr}) = 61 (-1; -4) \text{ dB bis } 67 (-2; -6) \text{ dB}^{2)}$

5.4.2 Anforderungen an die Schalldämmung in Gebäudeinneren nach nationaler Norm

Um die Anwendbarkeit dieser Werte im Rahmen von Prognoseberechnungen für den Schallschutznachweis in mehrgeschossigen Wohngebäuden zu überprüfen, können die Schalldämmwerte mit Anforderungswerten aus nationalen deutschen Regelwerken (DIN 4109, 2016; VDI 4100, 2012) verglichen werden. Die Anforderungen sowohl in DIN 4109 als auch in VDI 4100 an die Gesamtschallschutzsituation werden aber entweder über ein R'_w des Trennbauteils oder ein $D_{nT,w}$ der Übertragungssituation gestellt. Um hier Zielwerte für die Flankenschalldämmung zu generieren, sind plausible Annahmen hinsichtlich der Auftei-

lung der Schallenergieflüsse aber auch im Hinblick auf die Raumgrößen zu treffen. In Ermangelung weiterführender Regeln wurde das vereinfachte Nachweisverfahren nach DIN 4109 Beiblatt 1, Abschnitt 5.3 (DIN 4109, 1989) herangezogen. Es muss aber in diesem Zusammenhang klargemacht werden, dass hiermit nur unverbindliche Richtwerte gegeben werden, die alleine nicht die Erfüllung der Anforderungen garantieren und in keiner Weise einen detaillierten Nachweis des Schallschutzes ersetzen können. Hinsichtlich der Raumgrößen wurden Raumhöhen von 2,5 m und Raumtiefen von 3 m senkrecht zur Trennwand angenommen. Die damit ermittelten Zielwerte sind in Tabelle 3 dargestellt. Ein Abgleich der beiden Tabellen zeigt, dass die Bauweise prinzipiell geeignet ist zum Einsatz in Mehrfamilienwohnhäusern die den Mindestanforderungen an den Schallschutz in Deutschland (DIN 4109, 2016) aber auch einem erhöhten Schallschutz nach VDI 4100 mit SSt I und SSt II unterliegen. Die Zielwerte für die SSt III nach VDI 4100 können nicht bzw. nur in Einzelfällen erreicht werden wobei hier natürlich anzumerken ist, dass ein Nachweis der SSt III im mehrgeschossigen Wohnungsbau auch eine entsprechend hochschalldämmende Ausführung der Trennbauteile mit $R_w \geq 71$ dB erfordert, was in dieser Bauweise ebenfalls einen sehr hohen Aufwand bedeutet.

Tabelle 5-8: Zielwerte für die Flankenschalldämmung in Abhängigkeit des Anforderungsniveaus für Mehrfamilien-Wohnhäuser, die Zielwerte wurden in Anlehnung an das vereinfachte Nachweisverfahren nach der DIN 4109 Beiblatt 1, Abschnitt 5.3 ermittelt.

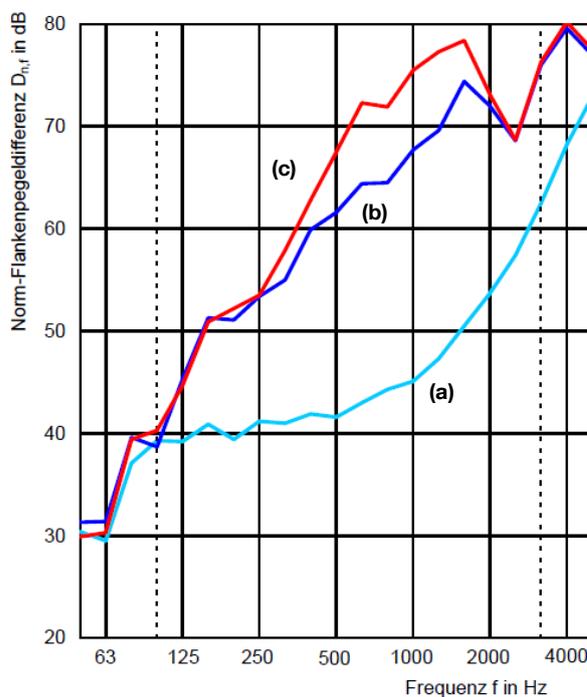
Regelwerk	Schallschutz- stufe	Anforderungen	
		Übertragungsrichtung	
		horizontal	vertikal
DIN 4109	-	Anforderung $R'_w = 53$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 60$ dB	Anforderung $R'_w = 54$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 61$ dB
VDI 4100	SSt I	Anforderung $D_{nT,w} = 56$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 63$ dB	Anforderung $D_{nT,w} = 56$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 64$ dB
	SSt II	Anforderung $D_{nT,w} = 59$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 66$ dB	Anforderung $D_{nT,w} = 59$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 67$ dB
	SSt III	Anforderung $D_{nT,w} = 64$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 71$ dB	Anforderung $D_{nT,w} = 64$ dB Zielwert $D_{n,f,w} = 72$ dB

5.4.3 Analysen zur horizontalen Flankenschalldämmung

Im Rahmen der Messreihen wurde untersucht wie sich konstruktive Modifikationen auf die horizontale Flankenschalldämmung auswirken. Exemplarisch sind hier nachfolgend Analysen zu folgenden Konstruktionsmerkmalen dargestellt:

- i. Modifikation der Fugenausführung
- ii. Verbesserung durch Montage einer Vorsatzschale
- iii. Vergleich zwischen eingestellter und vorgestellter Außenfassade
- iv. Einfluss einer Kopplung durch WDVS

Zu i: Da die Fugenausführung auch sehr stark von bauseitigen Leistungen der benachbarten Gewerke abhängt, die im Einzelfall stark variieren können wurden in dieser Studie nur die Maßnahmen überprüft die üblicherweise von einem Holzbauunternehmen durchgeführt werden können. Effekte durch zusätzliche Verkleidungen durch Bauplatten oder andere Materialien wurden hier nicht untersucht. Die durchgeführten Messungen haben aber bereits gezeigt (siehe Abbildung 5-51), dass bei einem einfachen Ausstopfen der Bauanschlussfuge eine erhöhte Schallübertragung resultiert, die zu einer signifikanten Verschlechterung der Schallschutzsituation führt. Allerdings konnte bereits mit einem beidseitigen Abkleben der Fuge die Flankenschalldämmung signifikant verbessert werden und es ist zu erwarten, dass weitere zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. ein Überputzen oder ein Abdecken der Bauanschlussfuge mit Bauplatten die Schalldämmung noch weiter verbessern oder zumindest nicht verschlechtern.



Grundkonstruktion: vorgestellte Variante (Grundwand) ohne Vorsatzschale und ohne Überbrückung durch WDVS

Modifikation der Fuge zwischen Trennwand – Außenfassade

(a): mit MW ausgestopft,
 $D_{n,f,w} = 47$ dB

(b): zusätzlich Fuge beidseitig abgeklebt mit Dichtungsband,
 $D_{n,f,w} = 64$ dB

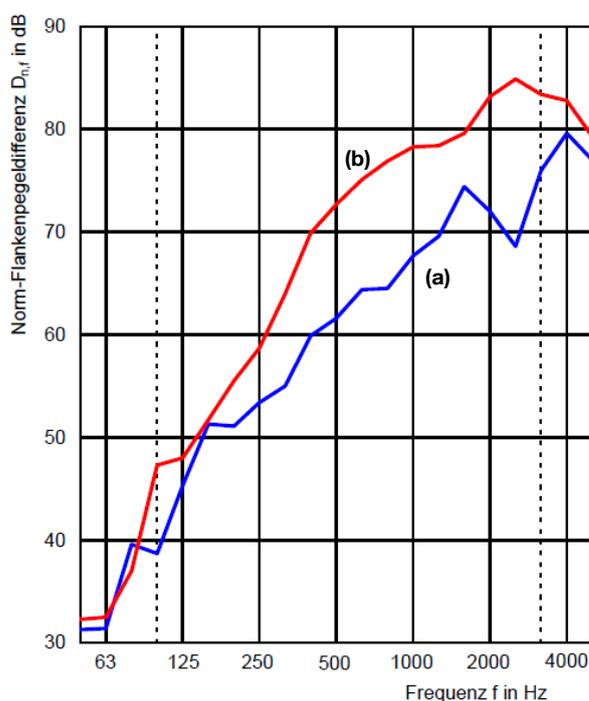
(c): zusätzlich Fuge beidseitig abgedichtet mit plastischem Dichtstoff,
 $D_{n,f,w} = 66$ dB

Abbildung 5-51: Horizontale Flankenschalldämmung bei Modifikation der Fugenausführung (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

Zu ii: Die Abdeckung der Außenwand durch eine zusätzliche Vorsatzschale wird üblicherweise hergenommen um die Flankenschalldämmung zu verbessern. Die Messungen im Zusammenhang mit der horizontalen Schallübertragung haben eine Verbesserung von $D_{n,f,w} = 64$ dB auf 71 dB ergeben (siehe Abbildung 2),

so dass hiermit eine Konstruktion realisiert werden kann, die geeignet ist zum Einsatz bei SSt II der VDI 4100 und unter bestimmten Voraussetzungen auch bei Gebäuden der SSt III eingesetzt werden kann. Es ist hierbei anzumerken, dass bereits die Grundkonstruktion eine recht hohe Flankenschalldämmung besitzt und damit schon geeignet ist zum Einsatz an Wohnungstrennwänden nach DIN 4109 und SSt I der VDI 4100.

Die hier geprüfte Vorsatzschale ist eine vergleichsweise einfache Konstruktion, welche auch einen gewissen Vorfertigungsgrad ermöglicht. Eine weitere Verbesserung der Flankenschalldämmung ist mit verbesserten Vorsatzschalen zu erwarten bei denen z.B. die Anzahl der Lagen GKB-Platten erhöht wird oder die freistehend montiert werden, siehe z.B. Abbildung 5-52 für Messungen der vertikalen Flankenschalldämmung.



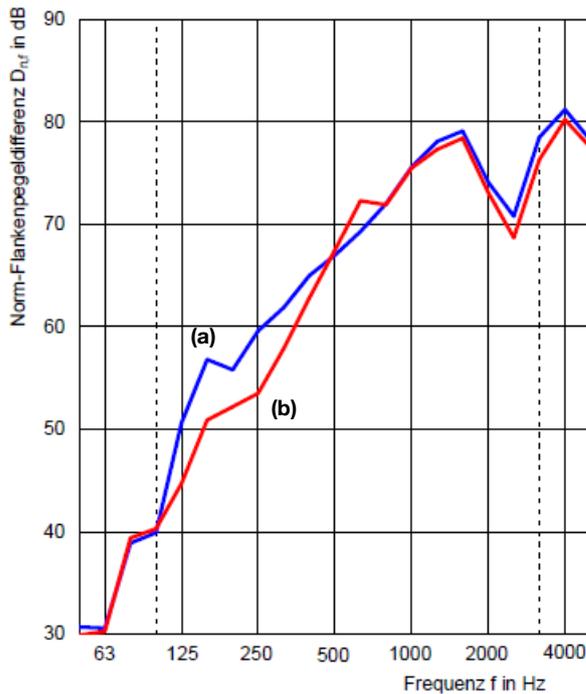
Grundkonstruktion: vorgestellte Variante (Grundwand) Einbaufuge mit Mineralwolle ausgefüllt und beidseitig mit Dichtungsband abgeklebt, ohne Überbrückung durch WDVS Einfluss durch Vorsatzschale

(a): ohne Vorsatzschale,
 $D_{n,f,w} = 64$ dB

(b): mit direkt montierter Vorsatzschale mit 12,5 mm GKB,
 $D_{n,f,w} = 71$ dB

Abbildung 5-52: Horizontale Flankenschalldämmung mit Einfluss durch Vorsatzschale (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

Zu iii: Der Einfluss der Lage der Trennwand (vorgestellte / eingestellte Außenwand) hat ebenfalls einen Einfluss auf die Flankenschalldämmung. Der direkte Vergleich an einer Grundwand ohne Vorsatzschale hat gezeigt, dass bei einer eingestellten Wand eine horizontale Flankenschalldämmung von $D_{n,f,w} = 69$ dB erreicht werden kann, wohingegen bei einer gleichen Wand die vorgestellt wird eine Flankenschalldämmung von $D_{n,f,w} = 66$ dB erreicht wird, siehe Abbildung 5-53. Es zeigt sich also, so dass mit einer eingestellten Wand eine mindestens genauso gute Flankenschalldämmung erreicht wird wie mit der vergleichbaren vorgestellten Wandkonstruktion. Die eingestellte Wand ist auch schon ohne zusätzliche Vorsatzschale geeignet zum Einsatz bei der SSt II der VDI 4100.



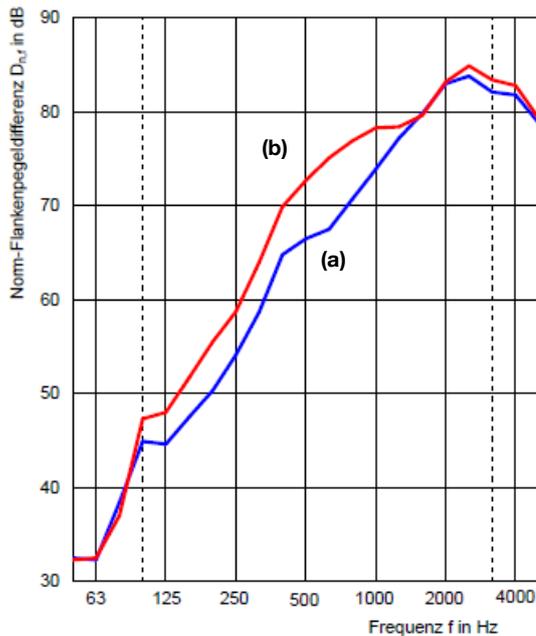
Grundkonstruktion: Grundwand, Einbaufuge mit Mineralwolle ausgefüllt und beidseitig mit plastischem Dichtstoff abgedichtet, ohne Überbrückung durch WDVS, ohne Vorsatzschale

Einfluss durch Einbaulage
(a): eingestellte Grundwand,
 $D_{n,f,w} = 69 \text{ dB}$

(b): vorgestellte Grundwand,
 $D_{n,f,w} = 66 \text{ dB}$

Abbildung 5-53: Horizontale Flankenschalldämmung im Vergleich von eingestellter zu vorgestellter Außenfassade (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

Zu iv: Bei der geprüften Grundkonstruktion zur Anbindung an eine Trennwand waren die Grundwandkonstruktionen in den horizontal benachbarten Räumen vollständig getrennt. Wird nun die vertikale Fuge zwischen den beiden Grundwänden außen durch das WDVS überdeckt, so stellt diese Überbrückung der Trennfuge eine Schallbrücke dar, deren Einfluss in der Schalldämmprüfung mit untersucht wurde. In Abbildung 5-54 ist der direkte Vergleich dargestellt. Hier ist zu sehen, dass sich durch die Überbrückung der Trennfuge eine signifikante Verschlechterung der Flankenschalldämmung ergibt, die im dargestellten Messbeispiel von $D_{n,f,w} = 71 \text{ dB}$ auf 66 dB reduziert wurde. Für die Praxis bedeutet das, dass bei hochschalldämmenden Wandanschlüssen eine konstruktive Trennung bis durch die äußere Wärmedämmung realisiert werden muss.



Grundkonstruktion: vorgestellte Variante (Grundwand) Einbaufuge mit Mineralwolle ausgefüllt und beidseitig mit Dichtungsband abgeklebt, mit direkt montierter Vorsatzschale

Einfluss durch WDVS (DHF-Platte)

(a): Trennfuge überbrückt mit WDVS,
 $D_{n,f,w} = 66$ dB

(b): ohne Überbrückung der Trennfuge durch WDVS,
 $D_{n,f,w} = 71$ dB

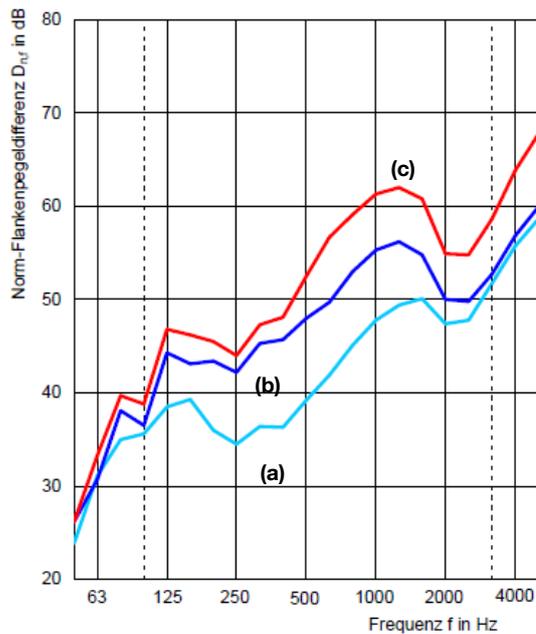
Abbildung 5-54: Horizontale Flankenschalldämmung mit Einfluss durch WDVS (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

5.4.4 Analysen zur vertikalen Flankenschalldämmung

Im Rahmen der Messreihen wurde untersucht wie sich konstruktive Modifikationen auf die vertikale Flankenschalldämmung auswirken. Die Fragestellungen waren ähnlich wie bei den Untersuchungen zur horizontalen Flankenschalldämmung, jedoch waren die Resultate und Konsequenzen wegen der unterschiedlichen Anschlusssituationen hier unterschiedlich. Exemplarisch sind hier nachfolgend Analysen zu folgenden Konstruktionsmerkmalen dargestellt.

- i. Modifikation der Fugenausführung
- ii. Verbesserung durch Montage einer Vorsatzschale
- iii. Vergleich zwischen eingestellter und vorgestellter Außenfassade

Zu i: Da die Fugenausführung auch sehr stark von bauseitigen Leistungen der benachbarten Gewerke abhängt, die im Einzelfall stark variieren können wurden in dieser Studie nur die Maßnahmen überprüft die üblicherweise von einem Holzbauunternehmen durchgeführt werden. Effekte durch zusätzliche Abdeckungen, z.B. Brandschutzschott oder Fußbodenaufbau wurden hier nicht untersucht. Die durchgeführten Messungen haben aber bereits gezeigt (siehe Abbildung 5-55), dass ein einfaches Ausstopfen der Bauanschlussfuge nicht ausreichend ist eine signifikante Fugenschallübertragung zu verhindern. Allerdings konnte bereits mit einem beidseitigen Abkleben der Fuge die Flankenschalldämmung signifikant verbessert werden und es ist zu erwarten, dass weitere zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. eine abgehängte Decke oder ein Fußbodenaufbau die Schalldämmung noch weiter verbessern.



Grundkonstruktion: vorgestellte Variante (Grundwand) ohne Vorsatzschale und ohne Überbrückung durch WDVS
 Modifikation der Fuge zwischen Trenndecke – Außenfassade

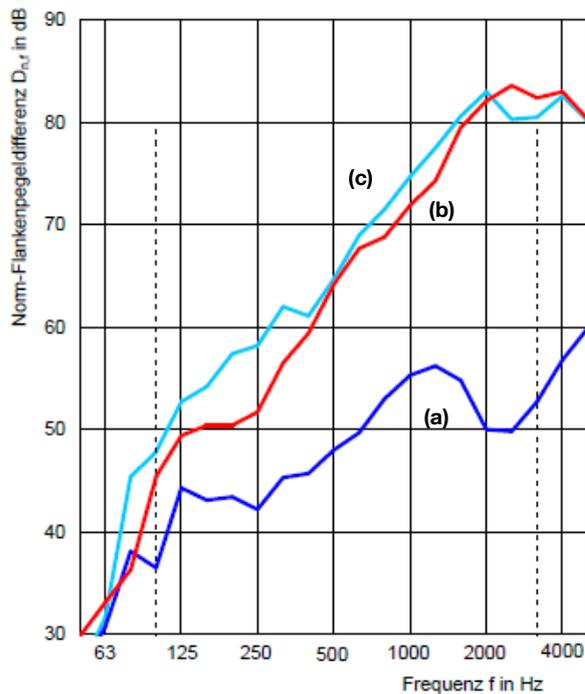
(a): mit MW ausgestopft,
 $D_{n,f,w} = 45$ dB

(b): zusätzlich Fuge beidseitig abgeklebt mit Dichtungsband,
 $D_{n,f,w} = 51$ dB

(c): zusätzlich Fuge beidseitig abgedichtet mit plastischem Dichtstoff,
 $D_{n,f,w} = 55$ dB

Abbildung 5-55: Vertikale Flankenschalldämmung bei Modifikation der Fugenausführung (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

Zu ii: Im Gegensatz zur Situation bei der horizontalen Flankenschallübertragung ist konstruktionsbedingt bei der vertikalen Flankenschalldämmung der vorgestellten Außenwand in der geprüften Grundsituation mit $D_{n,f,w} = 55$ dB nur eine eher geringe Flankenschalldämmung zu erzielen, die so nicht geeignet ist zum Einsatz bei einer Wohnungstrenndecke nach DIN 4109. Dies ist bereits durch frühere Messungen dokumentiert worden (Teibinger, M; Müllner, H, 2005). Daher wurde bei solchen Konstruktionen immer mit einer zusätzlichen Vorsatzschale gearbeitet. Die hier durchgeführten Vergleichsmessungen bei der vertikalen Schallübertragung haben eine Verbesserung von $D_{n,f,w} = 51$ dB auf 66 dB (direkt montierte Vorsatzschale) bzw. 69 dB (freistehende Vorsatzschale) ergeben (siehe Abbildung 5-56), so dass hiermit eine Konstruktion realisiert werden kann, die geeignet ist zum Einsatz bei SSt II der VDI 4100.



Grundkonstruktion: vorgestellte Variante (Grundwand) Einbaufuge mit Mineralwolle ausgefüllt und beidseitig mit Dichtungsband abgeklebt, ohne Überbrückung durch WDVS Einfluss durch Vorsatzschale

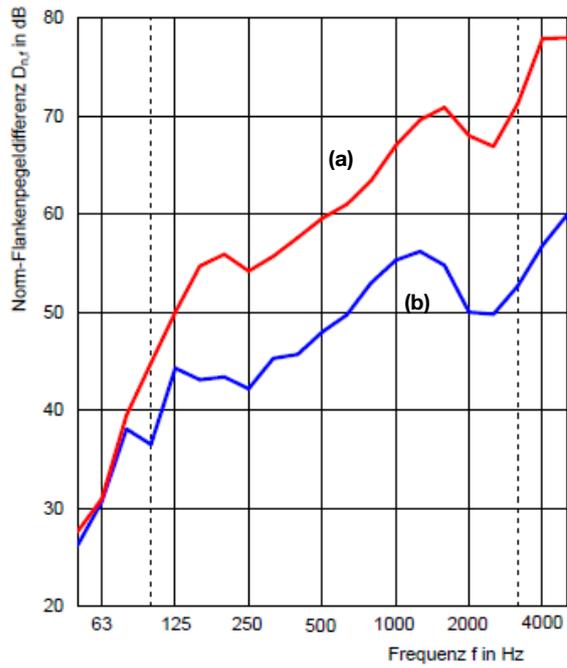
(a): ohne Vorsatzschale, $D_{n,f,w} = 51$ dB

(b): mit direkt montierter Vorsatzschale mit $2 \times 12,5$ mm GKB, $D_{n,f,w} = 66$ dB

(c): mit freistehender Vorsatzschale mit $2 \times 12,5$ mm GKB, $D_{n,f,w} = 69$ dB

Abbildung 5-56: Vertikale Flankenschalldämmung mit Einfluss durch Vorsatzschale (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

Zu iii: Der Einfluss der Lage der Trenndecke (vorgestellte / eingestellte Außenwand) hat ebenfalls einen Einfluss auf die Flankenschalldämmung. Der direkte Vergleich an einer Grundwand ohne Vorsatzschale hat gezeigt, dass bei einer eingestellten Wand eine vertikale Flankenschalldämmung von $D_{n,f,w} = 64$ dB erreicht werden kann, wohingegen bei einer gleichen Wand die vorgestellt wird eine Flankenschalldämmung von nur $D_{n,f,w} = 51$ dB erreicht wird, siehe Abbildung 5-57. Im Gegensatz zur Situation beim Trennwandanschluss wird also hier mit einer eingestellten Außenwand eine signifikant bessere Flankenschalldämmung erreicht wie mit der vergleichbaren vorgestellten Wandkonstruktion. Die eingestellte Wand ist auch schon ohne zusätzliche Vorsatzschale geeignet zum Einsatz bei der SSt I der VDI 4100 und es ist zu erwarten, dass diese Außenwandkonstellation mit zusätzlicher geeigneter Vorsatzschale auch für den Einsatz bei der SSt II der VDI 4100 geeignet ist.



Grundkonstruktion: Grundwand, Einbaufuge mit Mineralwolle ausgefüllt und beidseitig mit Dichtungsband abgeklebt, ohne Überbrückung durch WDVS, ohne Vorsatzschale
Einfluss durch Einbaulage

(a): eingestellte Grundwand,
 $D_{n,f,w} = 64$ dB

(b): vorgestellte Grundwand,
 $D_{n,f,w} = 51$ dB

Abbildung 5-57: Vertikale Flankenschalldämmung mit Vergleich eingestellter zu vorgestellter Außenfassade (Projektbericht Nr. 14-001534-PR01, 2015)

5.5 Brandschutz

5.5.1 Bauteile

Der Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit der Holz- und Stahlbetonbauteile kann auf unterschiedliche Art und Weise geführt werden. Zugrunde gelegt werden können normative Berechnungsmethoden oder Tabellenwerte. Allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse oder Zulassungen werden benötigt, wenn die Bauteilaufbauten von den normativen Aufbauten abweichen. In Kapitel 2.8.4 wurde die Bemessung auf Grundlage von Rechenmethoden für Bauteile in Holzrahmenbauweise für einen Feuerwiderstand von 30 Minuten und Tabellenwerten für die Stahlbetonbauweise für Feuerwiderstandsdauern von 30 bis 90 Minuten vorgestellt. Die dargestellten Feuerwiderstandsdauern ergeben sich aus den Anforderungen der MBO. (siehe Kapitel 2.8.2)

5.5.2 Anschlüsse

Die maßgebliche Beanspruchung tritt auf, wenn für die Decke ein Feuerwiderstand von 90 Minuten gefordert wird. Dem gegenüber steht der notwendige Feuerwiderstand der nichttragenden Außenwände von 30 Minuten (siehe Abbildung 5-58).

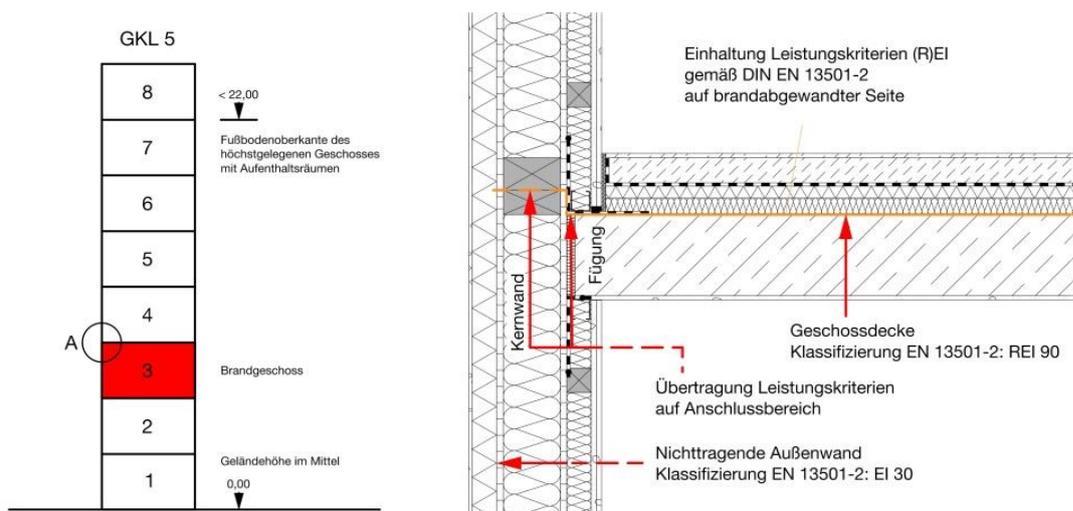


Abbildung 5-58: Brandschutztechnische Anforderungen im Anschlussbereich (Eigene Darstellung)

Nach § 28 MBO muss der Anschluss derart ausgeführt werden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist. Durch eine fiktive Verlängerung der brandschutztechnisch wirksamen Schichten der Decken wird der Anschlussbereich gebildet und die Anforderungen der Deckenkonstruktion übertragen.

Zur Bewertung der Anschlussdetails wird DIN 1992-1-2, Bild A.2 verwendet, welches Temperaturprofile in einer einseitig beanspruchten Decke mit einer Dicke von 200 mm darstellt. Nach 90 Minuten Branddauer liegt die 300° -Isotherme in Tiefe $x = 54$ mm. Die 300° -Isotherme stellt für Holzbauteile die Abbrandgrenze dar.

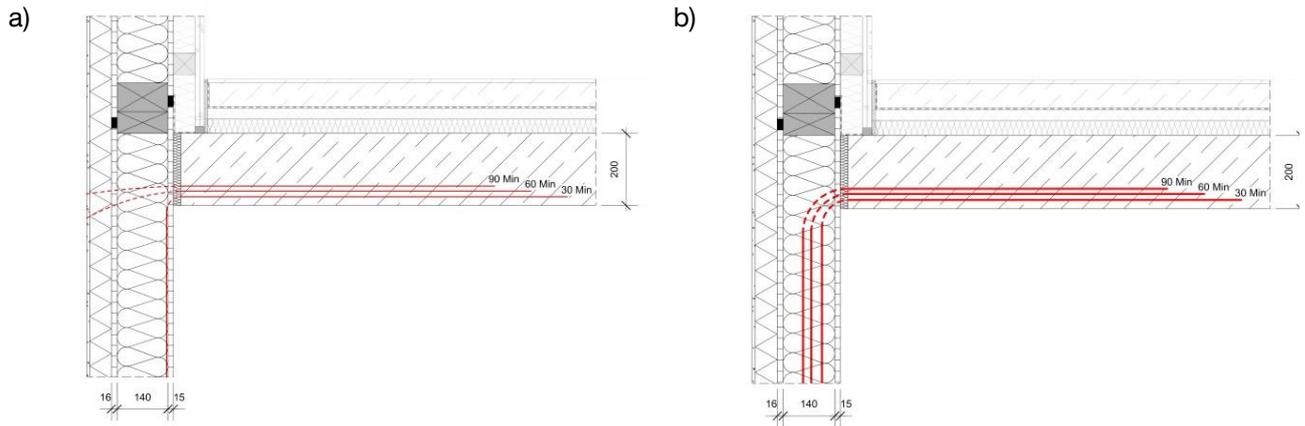


Abbildung 5-59: Schematische Darstellung des Verlaufs der 300°-Isotherme, a) Holzrahmenbauelemente mit Glaswolle (15 kg/m^3), b) Holzrahmenbauelemente mit Steinwolle (26 kg/m^3) (Eigene Darstellung)

Die Isothermenverläufe zeigen, dass der Anschlussbereich der Holzrahmenbauelemente nach 90 Minuten Brandbeanspruchung im kalten Bereich noch im kalten Bereich liegt und damit eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit aufweist. Brandversuche aus dem Projekt „smartTES“ (Löbus, 2014) bestätigen das derartige Anschlusssituationen eine Feuerwiderstandsfähigkeit von 90 Minuten erreichen. D.h. die Leistungskriterien (R)EI werden im Anschlussbereich erfüllt.

5.6 Lebenszyklusanalyse

Im Sinne einer Parameterstudie wurden die Beispielprojekte anhand einer Ökobilanz untereinander verglichen, da sie ein breites Spektrum an Ausführungsvarianten bieten. Darin enthalten sind die Herstellung der Holzrahmenbauelemente von der Rohstoffgewinnung bis zur Fertigstellung der einzelnen Bauprodukte ("Cradle to Gate"), der Ersatz von Schichten mit einer Lebensdauer von weniger als 50 Jahren und der Entsorgungsprozess mit den entsprechenden Gutschriften und Lasten. Der Vergleich wurde durch die Ökobilanz verschiedener Fassaden in Massivbauweise und einer Aluminium-Vorhangfassade ergänzt. Im Folgenden sind zunächst die Bauteilaufbauten mit den verwendeten Materialien und die Ergebnisse der Ökobilanz im Detail dargestellt. Auf diese Werte beziehen sich die Aussagen in Kapitel 4.2.3.

In den Zahlen-Tabellen sind Energieeinsatz und Umweltwirkungen, aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen und Systembereichen, abzulesen. Hierbei sind aufgrund der besseren Übersichtlichkeit die Befestigungswinkel jeweils dem Kernelement zugeschlagen. Als Zusatzinformation ist jeweils der Holzanteil (ohne Zellulose) und der Heizwert des verbauten Holzes angefügt. Dabei wird deutlich, dass der Heizwert als im Verlauf seines Wachstums im Holz gespeicherte Sonnenenergie jeweils einen hohen Anteil am erneuerbaren Primärenergieinhalt der Außenwandelemente darstellt.

Für alle Außenwände wurde ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gewählt. Funktionelle Einheit ist 1 m² Außenwandelement.

Aus den Analysen der Beispielprojekte wurden in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss Standard-Wandaufbauten entwickelt. Die Analyse der Standard-Wandaufbauten und ihrer Variationen (hinsichtlich Fassadenbekleidung, Dämmstoffart und Installationsebene) ist im Konstruktionskatalog im Detail dargestellt.

5.6.1 Bauteilaufbauten und Ergebnisse der Ökobilanz der Beispielprojekte

5.6.1.1 Vorbemerkung

Für die einzelnen Ebenen der Bauteilaufbauten wurde die nachfolgend dargestellte Farblegende verwendet.

Tabelle 5-9: Farbliche Kennzeichnung der Elementebenen (Eigene Darstellung)

Legende
Fassade
Kernelement
Befestigung
Innerer Abschluss

5.6.1.2 Boyenstrasse

Tabelle 5-10: Bauteilaufbau der Außenwand Boyenstrasse (Eigene Darstellung)

Außenwand Boyenstrasse		
Baustoff	Schichtdicke	Ökodaten
	[mm]	Ökobaudat 2011
Putz	15	2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch
Holzweichfaserdämmung	60	2.10.01 Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)
HWS-Platte (MDF)	15	3.2.07 MDF - Egger
KVH 60/240 Achsabstand 62,5cm	240	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Zellulosefüllung	240	2.11.01 Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff
HWS-Platte (OSB)	15	3.2.04 OSB (Durchschnitt)
Stahlwinkel		4.1.03 Stahlprofil
KVH 60/60 Achsabstand 62,5cm	60	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Dämmung mineralisch	60	2.1.01 Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)
GKF-Platte	2x 12,5	1.3.13 Gipskartonplatte (Feuerschutz)

Tabelle 5-11: Ergebnisse der Ökobilanz der Außenwand Boyenstrasse nach Bauteilkomponenten (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus anteilig	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Wärmedämmverbundsystem (Kratzputz ca. 15mm)								
Herstellung	357,32	211,90	9,66	2,60E-07	6,70E-03	5,16E-02	8,35E-03	1,64E-01
Entsorgung	-178,35	-1,51	3,87	-4,24E-07	-5,04E-04	-3,62E-03	-5,50E-04	-7,84E-02
Instandhaltung	178,97	210,39	13,53	-1,64E-07	6,19E-03	4,80E-02	7,80E-03	8,56E-02
Gesamt	357,94	420,77	27,06	-3,29E-07	1,24E-02	9,59E-02	1,56E-02	1,71E-01
Kernelement								
Herstellung	348,69	636,11	-46,42	1,30E-06	1,00E-02	7,00E-02	1,30E-02	1,44E-01
Entsorgung	-765,15	-18,46	27,03	-1,51E-06	-3,39E-03	-7,00E-03	8,49E-04	-3,32E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	-416,46	617,65	-19,39	-2,12E-07	6,61E-03	6,31E-02	1,38E-02	-1,88E-01
Installationsebene								
Herstellung	119,90	66,41	1,74	9,53E-09	2,03E-03	2,18E-02	3,50E-03	5,43E-02
Entsorgung	-34,81	-2,71	3,34	-5,11E-09	-1,83E-04	-1,88E-03	-1,17E-04	-1,45E-02
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	85,09	63,70	5,08	4,42E-09	1,85E-03	1,99E-02	3,38E-03	3,98E-02

Tabelle 5-12: Gesamtergebnisse der Ökobilanz der Außenwand Boyenstrasse (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus gesamt	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Herstellung	825,91	914,42	-35,02	1,57E-06	1,87E-02	1,43E-01	2,48E-02	3,62E-01
Entsorgung	-978,31	-22,68	34,24	-1,94E-06	-4,07E-03	-1,25E-02	1,82E-04	-4,25E-01
Instandhaltung	178,97	210,39	13,53	-1,64E-07	6,19E-03	4,80E-02	7,80E-03	8,56E-02
Gesamt	26,57	1102,10	12,74	-5,36E-07	2,08E-02	1,79E-01	3,28E-02	2,26E-02
Flächenbezogene Masse m [kg/m²] gesamt				109,80				

Tabelle 5-13: Holzanteil der Außenwand Boyenstrasse (Eigene Darstellung)

Holzanteil	Gewichtsanteil	Heizwert Holz [MJ]	Anteil PE ern. (Herst.)
	32%	677,44	74%

5.6.1.3 CO₂-neutrale GrundschuleTabelle 5-14: Bauteilaufbau der Außenwand CO₂-neutrale Grundschule (Eigene Darstellung)

Außenwand CO ₂ -neutrale Grundschule		
Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaudat 2011
Faserzementplatte (Z-31.4-183)	15	1.3.12 Fassadentafel Pictura Natura pro – Eternit
Vertikale Lattung	40	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Horizontale Lattung	150	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Holzweichfaserdämmplatte	40	2.10.01 Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)
Konstruktionsvollholz	240	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Steinwollendämmung	240	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)
HWS-Platte (OSB4)	15	3.2.04 OSB (Durchschnitt)
Stahlwinkel		4.1.03 Stahlprofil
GF-Platte	12,5	1.3.13 Gipsfaserplatte

Tabelle 5-15: Ergebnisse der Ökobilanz der Außenwand CO₂-neutrale Grundschule nach Bauteilkomponenten (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus anteil	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Fassadenbekleidung								
Herstellung	222,19	242,93	3,41	6,93E-07	7,49E-03	6,98E-02	6,59E-03	9,29E-02
Entsorgung	-105,62	-8,13	9,61	-1,52E-08	-7,04E-04	-7,02E-03	-5,88E-04	-4,42E-02
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	116,58	234,80	13,02	6,78E-07	6,79E-03	6,28E-02	6,00E-03	4,87E-02
Kernelement								
Herstellung	537,20	598,05	-17,41	5,84E-07	1,22E-02	1,32E-01	1,70E-02	2,38E-01
Entsorgung	-445,40	-14,81	20,32	-7,66E-07	-2,44E-03	-1,77E-02	-1,47E-03	-1,92E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	91,81	583,25	2,91	-1,82E-07	9,71E-03	1,15E-01	1,56E-02	4,58E-02
Installationsebene								
Herstellung	68,81	2,22	4,30	4,10E-09	5,98E-04	5,61E-03	9,55E-04	3,17E-02
Entsorgung	0,67	0,03	0,03	2,37E-11	3,36E-05	3,17E-04	5,54E-05	3,12E-04
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	69,48	2,25	4,34	4,12E-09	6,31E-04	5,93E-03	1,01E-03	3,20E-02

Tabelle 5-16: Gesamtergebnisse der Ökobilanz der Außenwand CO₂-neutrale Grundschule (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus gesamt	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Herstellung	828,21	843,21	-9,70	1,28E-06	2,02E-02	2,08E-01	2,46E-02	3,62E-01
Entsorgung	-550,35	-22,91	29,96	-7,81E-07	-3,11E-03	-2,45E-02	-2,00E-03	-2,36E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	277,86	820,30	20,26	5,00E-07	1,71E-02	1,83E-01	2,26E-02	1,27E-01
Flächenbezogene Masse m [kg/m²] gesamt				75,60				

Tabelle 5-17: Holzanteil der Außenwand CO₂-neutrale Grundschule (Eigene Darstellung)

Holzanteil	Gewichtsanteil	Heizwert Holz [MJ]	Anteil PE ern. (Herst.)
	35%	505,02	60%

5.6.1.4 LCT One

Tabelle 5-18: Bauteilaufbau der Außenwand LCT One (Eigene Darstellung)

Außenwand LCT One		
Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaudat 2011
Aluminiumblech (vernachlässigt, da recycelt)	6	4.3.01 Aluminiumblech
Lattung 60/82	82	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Holzfaserverplatte zementgebunden	60	3.2.08 Holzzementplatte Duripanel - Eternit
Konstruktionsvollholz	260	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Mineralwolle	260	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)
OSB Platte	18	3.2.04 OSB (Durchschnitt)
Stahlwinkel		4.1.03 Stahlprofil
Lattung 30/50	30	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Spanplatte	18	3.2.06 Spanplatte (Durchschnitt)

Tabelle 5-19: Ergebnisse der Ökobilanz der Außenwand LCT One nach Bauteilkomponenten (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus anteilig	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Fassadenbekleidung								
Herstellung	33,62	84,07	-6,47	4,81E-09	4,85E-04	5,22E-03	5,69E-04	1,41E-02
Entsorgung	-49,42	-3,79	4,44	-7,05E-09	-3,47E-04	-3,44E-03	-3,06E-04	-2,07E-02
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	-15,80	80,28	-2,03	-2,24E-09	1,38E-04	1,78E-03	2,64E-04	-6,63E-03
Kernelement								
Herstellung	657,35	684,65	-9,96	1,46E-06	1,57E-02	1,81E-01	2,28E-02	2,76E-01
Entsorgung	-511,16	-25,73	36,66	-5,97E-07	-2,62E-03	-1,39E-02	-6,11E-05	-2,18E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	146,19	658,93	26,70	8,61E-07	1,31E-02	1,67E-01	2,27E-02	5,87E-02
Installationsebene								
Herstellung	126,62	306,19	-18,07	1,47E-09	4,33E-03	2,40E-02	3,34E-03	5,20E-02
Entsorgung	-247,15	-4,48	7,88	-6,05E-07	-1,01E-03	1,80E-03	1,52E-03	-1,07E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	-120,52	301,72	-10,19	-6,03E-07	3,32E-03	2,58E-02	4,86E-03	-5,51E-02

Tabelle 5-20: Gesamtergebnisse der Ökobilanz der Außenwand LCT One (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus gesamt	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Herstellung	817,59	1074,90	-34,50	1,46E-06	2,06E-02	2,10E-01	2,67E-02	3,42E-01
Entsorgung	-807,73	-33,99	48,98	-1,21E-06	-3,98E-03	-1,55E-02	1,15E-03	-3,45E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	9,87	1040,90	14,48	2,55E-07	1,66E-02	1,94E-01	2,78E-02	-3,04E-03
Flächenbezogene Masse m [kg/m²] gesamt				99,25				

Tabelle 5-21: Holzanteil der Außenwand LCT One (Eigene Darstellung)

Holzanteil	Gewichtsanteil	Heizwert Holz [MJ]	Anteil PE ern. (Herst.)
	42%	794,03	74%

5.6.1.5 Tor zur Welt

Tabelle 5-22: Bauteilaufbau der Außenwand Tor zur Welt (Eigene Darstellung)

Außenwand Tor zur Welt		
Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaodat 2011
Stülpchalung	25	3.1.01 Schnittholz Lärche (12% Feuchte/10,7% H2O)
Traglattung	35	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Zementgeb., glasfaserbewehrte Sandwichplatte (Z-31.1-176)	15	1.3.04 Leichtbetonelemente - BV Leichtbeton
Konstruktionsvollholz	260	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Mineralwolle	260	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)
PE-Folie	0,2	6.6.02 Dampfbremse PE
GF-Platte	15	1.3.13 Gipsfaserplatte
Stahlwinkel		4.1.03 Stahlprofil
Konstruktionsvollholz	75	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Mineralwolle	75	2.1.01 Mineralwolle (Innenausbau-Dämmung)
GKF-Platte	2x 12,5	1.3.13 Gipskartonplatte

Tabelle 5-23: Ergebnisse der Ökobilanz der Außenwand Tor zur Welt nach Bauteilkomponenten (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus anteilig	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Fassadenbekleidung								
Herstellung	124,52	342,34	-27,84	5,61E-08	1,99E-03	2,38E-02	2,89E-03	5,33E-02
Entsorgung	-213,63	-16,38	19,20	-3,05E-08	-1,50E-03	-1,49E-02	-1,32E-03	-8,94E-02
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	-89,11	325,96	-8,64	2,56E-08	4,87E-04	8,92E-03	1,56E-03	-3,61E-02
Kernelement								
Herstellung	433,98	281,64	5,64	1,20E-07	9,88E-03	1,16E-01	1,46E-02	1,94E-01
Entsorgung	-160,14	-12,10	14,43	-1,51E-08	-1,02E-03	-1,01E-02	-7,93E-04	-6,72E-02
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	273,84	269,54	20,07	1,04E-07	8,86E-03	1,06E-01	1,38E-02	1,27E-01
Installationsebene								
Herstellung	139,85	83,06	1,25	3,50E-07	2,43E-03	2,95E-02	4,03E-03	6,09E-02
Entsorgung	-43,78	-3,40	4,16	-6,39E-09	-2,43E-04	-2,48E-03	-1,68E-04	-1,83E-02
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	96,07	79,66	5,40	3,44E-07	2,19E-03	2,70E-02	3,87E-03	4,26E-02

Tabelle 5-24: Gesamtergebnisse der Ökobilanz der Außenwand Tor zur Welt (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus gesamt	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen- Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Herstellung	698,35	707,04	-20,96	5,26E-07	1,43E-02	1,69E-01	2,15E-02	3,08E-01
Entsorgung	-417,54	-31,88	37,79	-5,20E-08	-2,76E-03	-2,74E-02	-2,28E-03	-1,75E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	280,81	675,16	16,83	4,74E-07	1,15E-02	1,42E-01	1,92E-02	1,33E-01
Flächenbezogene Masse m [kg/m²] gesamt				96,64				

Tabelle 5-25: Holzanteil der Außenwand Tor zur Welt (Eigene Darstellung)

Holzanteil	Gewichts- anteil	Heizwert Holz [MJ]	Anteil PE ern. (Herst.)
	36%	672,48	95%

5.6.1.6 Wohnsinn2

Tabelle 5-26: Bauteilaufbau der Außenwand Wohnsinn2 (Eigene Darstellung)

Außenwand Wohnsinn2		
Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaodat 2011
Putz	5	2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Dekorputz mineralisch
Putzträgerplatte Bluclad	10	1.3.12 Faserzement Bauplatte Bluclad - Eternit
Holzweichfaserplatte	60	2.10.01 Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)
Konstruktionsvollholz	300	3.1.02 Konstruktionsvollholz
Zellulosedämmung	300	2.11.01 Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff
GF-Platte	15	1.3.13 Gipsfaserplatte
Stahlwinkel		4.1.03 Stahlprofil
Folie (Dampfsperre)	0,2	6.6.02 Dampfbremse PE
GKF-Platte	12,5	1.3.13 Gipskartonplatte (Feuerschutz)

Tabelle 5-27: Ergebnisse der Ökobilanz der Außenwand Wohnsinn2 nach Bauteilkomponenten (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus anteilig	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen- Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Fassadenbekleidung								
Herstellung	166,26	28,92	13,78	2,48E-07	4,46E-03	3,06E-02	4,72E-03	7,19E-02
Entsorgung	4,00	0,28	0,42	2,13E-10	2,32E-04	1,89E-03	2,75E-04	1,84E-03
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	170,26	29,19	14,20	2,48E-07	4,69E-03	3,25E-02	5,00E-03	7,38E-02
Kernelement								
Herstellung	392,64	523,32	-38,88	4,14E-08	6,44E-03	5,48E-02	6,77E-03	1,77E-01
Entsorgung	-705,99	-19,89	25,03	-1,21E-06	-3,91E-03	-3,23E-02	-3,97E-03	-3,07E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	-313,35	503,43	-13,85	-1,16E-06	2,53E-03	2,25E-02	2,80E-03	-1,30E-01
Installationsebene								
Herstellung	33,87	1,67	2,10	1,73E-09	4,26E-04	3,53E-03	8,38E-04	1,59E-02
Entsorgung	0,53	0,02	0,03	1,90E-11	2,69E-05	2,53E-04	4,43E-05	2,49E-04
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	34,41	1,69	2,13	1,75E-09	4,53E-04	3,78E-03	8,82E-04	1,61E-02
Flächenbezogene Masse m [kg/m²] gesamt				90,95				

Tabelle 5-28: Gesamtergebnisse der Ökobilanz der Außenwand Wohnsinn2 (Eigene Darstellung)

Lebenszyklus gesamt	PE n. ern. [MJ]	PE ern. [MJ]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv]	POCP [kg Ethen-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	ADP [kg Sb-Äqv.]
Herstellung	592,77	553,90	-22,99	2,91E-07	1,13E-02	8,90E-02	1,23E-02	2,64E-01
Entsorgung	-701,45	-19,59	25,47	-1,21E-06	-3,65E-03	-3,02E-02	-3,65E-03	-3,05E-01
Instandhaltung	0	0	0	0	0	0	0	0
Gesamt	-108,68	534,31	2,47	-9,15E-07	7,67E-03	5,88E-02	8,68E-03	-4,04E-02

Tabelle 5-29: Holzanteil der Außenwand Wohnsinn2 (Eigene Darstellung)

Holzanteil	Gewichtsanteil	Heizwert Holz [MJ]	Anteil PE ern. (Herst.)
	25%	440,36	80%

5.6.1.7 Vergleichsfassaden

Tabelle 5-30: Bauteilaufbauten der Vergleichsfassaden (Eigene Darstellung)

WA Ziegel-Perlite

Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaodat 2011
Wärmedämmputz	20	1.4.04 Dämmputz EPS – IWM
Perlitegefüllter Ziegel	490	1.3.02 Perlitgefüllte Ziegel POROTON S
Innenputz	15	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz

WA Ziegel-WDVS

Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaodat 2011
Putz	8	2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Dekorputz mineralisch
Mineralwolle	200	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)
Ziegel	240	1.3.02 Mauerziegel Durchschnitt - Poroton
Innenputz	15	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz

WA Stahlbeton-WDVS

Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaodat 2011
Putz	8	2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Dekorputz mineralisch
Mineralwolle	220	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden-Dämmung)
Stahlbeton	250	1.4.01 Transportbeton C20/25 4.1.02 Bewehrungsstahl
Innenputz	10	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz

WA Alu-Vorhangfassade

Baustoff	Schichtdicke	Ökodat
	[mm]	Ökobaodat 2011
Sandwichausfachung	2	4.3.01 Aluminium Blech
	300	2.4.03 PU-Dämmplatte (PU Blockschaum, 15 cm) - IVP
	2	4.3.01 Aluminium Blech
		4.7.01 Eloxieren von Aluminium
Tragstruktur Aluminium		4.3.01 Aluminium Profil

5.6.2 Analyse und Folgerungen

Grundsätzlich schneiden die Holzrahmenbaufassaden in allen Indikatoren der Ökobilanz außer hinsichtlich der erneuerbaren Primärenergie besser ab als die Außenwände in Massivbauweise oder die Aluminium-Vorhandfassade. Es lassen sich nur einzelne Wirkungskategorien finden, in denen eine der Vergleichsfassaden besser abschneidet als einzelne Holzrahmenbau-Fassaden, die Unterschiede sind in diesem Fall jedoch relativ gering. Insgesamt wird ersichtlich, dass die Holzrahmenbaufassaden sich besonders hinsichtlich Treibhauspotenzial und nicht erneuerbarer Primärenergie auszeichnen: Sie weisen ein um ein Vielfaches geringeres Treibhauspotenzial als mineralische Fassaden auf und einen wesentlich geringeren Primärenergieinhalt (s. Kapitel 4.2.3).

Ein Vergleich innerhalb der Holzrahmenbaufassaden macht deutlich, dass U-Wert und Ökobilanz-Ergebnisse insofern entkoppelt sind, als sie bei den Beispielprojekten nicht korrelieren. Die Wand mit dem geringsten U-Wert hat nicht die höchsten Umweltwirkungen. Noch deutlicher wird dies, wenn man die Vergleichsfassaden mit einbezieht, die mit einem U-Wert von ca. $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ weniger Dämmwirkung besitzen aber dennoch einen höheren Primärenergieinhalt und höhere Umweltwirkungen zeigen als die Holzrahmenbaufassaden.

Als Bauteilkomponente ist bei den Holzrahmenbaufassaden für den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt und das Treibhauspotenzial Kernelement ausschlaggebend, gefolgt von der Fassadenbekleidung. Die Installationsebene ist aufgrund des geringen Materialaufwandes weniger relevant, die Befestigungselemente fallen am geringsten ins Gewicht.

Daher sollte zur ökologischen Optimierung der Fassaden besonders auf die Verwendung ökologisch vorteilhafter Dämmstoffe, wie zum Beispiel Zellulose, im Kernelement geachtet werden. Für die Fassadenbekleidung ergeben sich Vorteile für hinterlüftete Fassaden, die aber im Einzelfall mit brandschutztechnischen Belangen (Brandsperrern sind ab Gebäudeklasse 4 erforderlich) und hinsichtlich Wärmebrücken evaluiert werden müssen.

6 Zusammenfassung

6.1 Projektergebnisse

6.1.1 Grundlagen

Die Hybridbauweise wird definiert aus der Kombination integraler Fassadenelementen in Holzbauweise mit Stahlbetontragwerken in Skelett- oder Schottenbauweise. Allerdings fehlten bisher standardisierte und stringent geführte Planungsunterlagen für diese Bauweise. Deswegen war das Ziel des Forschungsprojektes, die vorgefertigten Holzfassadenelemente zur Herstellung einer hochgedämmten, energie- und ressourceneffizienten Gebäudehülle unter überwiegender Verwendung von Baustoffen aus nachwachsenden Rohstoffen weiterzuentwickeln. Ferner wurden integrale Fragestellungen der Tragwerksplanung, des Wärme- und Feuchteschutzes, Schallschutzes und Brandschutzes untersucht, welche sich aus der speziellen Form der Hybridbauweise ergeben. Durch die zunehmende Bedeutung der Lebenszyklusanalyse (LCA) und die steigende Relevanz der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen, wurden im Rahmen des Projektes Entscheidungsvorgaben für Planer und Investoren entwickelt.

Die Fassadenelemente können als vorgestellte, vorgehängte oder eingestellte Variante ausgeführt werden, wobei in Abstimmung mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe die erste und letzte Variante weiter verfolgt wurde.

Aus den theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurde ein standardisierter Katalog für die Anwendung der vorgefertigten Holzrahmen- bzw. Holztafelbauelemente als Fassadenhüllkonstruktion von Stahlbeton-Hochbauwerken erstellt. Der Konstruktionskatalog beinhaltet eine umfassende systematische Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten und Kombinationen. Die Anwendung umfasst vorrangig Standardgebäude nach Musterbauordnung (MBO), z.B. Wohn- und Bürogebäude bis zur Hochhausgrenze sowie Sonderbauten, z.B. Schulen und Beherbergungsstätten, bei denen anhand schutzzielorientierter Betrachtungen brandschutztechnisch gleichwertige Lösungen umsetzbar sind.

Durch die Abrundung und das Schließen verbliebener Wissenslücken sowie der abschließenden Bereitstellung einer umfassenden Planungs- und Ausführungsinformation werden in Zukunft sowohl national und international tätige Planungsbüros als auch Unternehmen der Bauindustrie und -wirtschaft in die Lage versetzt, entsprechende Hybridbauweisen auf gesicherter technischer Grundlage anwenden zu können.

6.1.2 Mechanische Festigkeit und Standsicherheit

Da die Anbindung der Holzrahmenbauelemente an den Neubau von Stahlbetonhochbauwerken erfolgt, wurde der Fokus auf die statischen Bauteilnachweise für die Holzrahmen- bzw. Holztafelbauelemente und Stahlbetondecken mit und ohne Randunterzügen gelegt.

Als Grundlage für die Bemessung der Holzrahmen- bzw. Holztafelbauelemente sowie infolge der Lastweiterleitung auf das Stahlbetontragwerk wurden vereinfachend Mischprofile zu den Geländekategorien nach DIN EN 1991-1-4/NA erstellt. Als realistischer Maximalfall kann von einem Mischprofil der Geländekategorien I und II für küstennahe Gebiete sowie auf Inseln der Ostsee in Kombination mit einer maximalen Gebäudehöhe von 24 m (\leq Gebäudeklasse 5) ausgegangen werden (vgl. Kapitel 2.2.3, Abbildung 2-7).

Die Bemessung der Holzrahmenbauelemente erfolgte für zwei unterschiedliche Wand- bzw. Geschosshöhen $h_1 = 3,00$ m und $h_2 = 4,00$ m. Die Geschosshöhe $h_1 = 3,00$ m ist üblicherweise in Wohngebäuden anzutreffen. Eine Höhe $h_2 = 4,00$ m ergibt sich zum Beispiel bei Bürogebäuden aufgrund der Führung von Installationsmedien unterhalb der Decke. Bei einer geschossweisen Beanspruchung der Holzrahmenbau-

elemente wurde ein erforderlicher Mindestquerschnitt $b / h = 60 \text{ mm} / 120 \text{ mm}$ ermittelt (vgl. Kapitel 2.2.4.5, Tabelle 2-3).

Im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante der nichttragenden Außenwand können die Eigenlastanteile der einzelnen Fassadenelemente, ausgenommen im Brandfall, bis zum Fundament bzw. der Kellerdecke weitergeleitet werden. Bei diesen sogenannten selbsttragenden Fassadenelementen dominiert der Tragfähigkeitsnachweis des Querdrucks zwischen Ständer und Schwelle im untersten Element. Zu dieser Beanspruchung der Holzrahmenbauelemente wurde ein erforderlicher Mindestquerschnitt $b / h = 60 \text{ mm} / 120 - 140 \text{ mm}$ in Abhängigkeit von der Bezugshöhe $z = 20$ oder 24 m ermittelt, (vgl. Kapitel 2.2.4.5, Tabelle 2-4).

Die Kombination der Hybridbauteile erfordert eine Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf die Verformungen des Stahlbetontragwerks im Zustand II und die Befestigung der Holzfassadenelemente am Stahlbetontragwerk. Zur Bewertung der Schnittstelle zwischen Holzfassadenelementen und Stahlbetontragwerk wurden in Simulationsrechnungen die Verformungen eines End- sowie Innenfelds eines Deckensystems mithilfe der Finite-Elemente-Methode untersucht. Ziel war es, das Verformungsverhalten unter vorgegebenen Randbedingungen zu prognostizieren (siehe Kapitel 5.1.1) und somit die Planungssicherheit zu verbessern. Die numerische Simulation zum Verformungsverhalten des Stahlbetontragwerks im Zustand II (siehe Kapitel 5.2) wurde durch Bauteilversuche verifiziert. Insgesamt wurden 80 Berechnungen zur Ermittlung der Verformungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind mit den Grenzfunktionen für die zulässige Verformung von $l/250$ und $l/500$ in Diagrammen dargestellt. (siehe Kapitel 5.1.1.1)

Im Gegensatz zu Stahlbetonbauteilen kann bei der Verwendung von Spannbetondielen das Verformungskriterium $l/500$ gesichert eingehalten werden. Aufgrund der sehr individuellen Lösungsansätze wurden sechs Berechnungen zur Vordimensionierung der Spannbetondielen eines Herstellers durchgeführt. (siehe Kapitel 5.1.1.2)

Die mechanische Verbindung zwischen Fassadenelement und Massivbauteil erfolgt über Stahlwinkelprofile, Holzschrauben und Betonanker.

Bei der eingestellten Bauweise werden die Eigenlasten der Holzfassade über Kontaktpressung in das Massivbauteil eingeleitet. Es sind lediglich Horizontallasten infolge Wind oder Abstützungs- bzw. Holmlasten für den quasi-ständigen Lastfall zu berücksichtigen. Die vorgestellte Variante ist im Hinblick auf das Verbindungsdetail wesentlich komplizierter anzusehen, da die vertikalen Lasten im Brandfall über das Stahlprofil abgetragen werden müssen. Dabei ist auch entscheidend, welchen Abstand und somit Hebelarm das Fassadenelement von der tragenden Massivbaustruktur besitzt. Durch die Biegebeanspruchung ist hierbei das Stahlprofil das maßgebende Verbindungsmittel. Berechnungsansätze für die Verbindung mit Stahlwinkel sind im Kapitel 5.1.2 enthalten.

6.1.3 Energieeinsparung und Wärmeschutz

Zur Steigerung der Energieeffizienz und Lebensdauer der Bauteile wurden die grundlegenden Anforderungen und Nachweisverfahren für den Wärme- und Feuchteschutz (siehe Kapitel 2.4 und 2.5) und die Luft- und Winddichtheit (siehe Kapitel 2.6 und 2.7) sowie gesetzliche Vorgaben und weitere Richtwerte (siehe Kapitel 2.11) für Bauteile und Bauteilanschlüsse zusammengestellt. Ein besonderer Fokus wurde auf die Berechnung von Wärmebrücken gelegt, die insbesondere seit der Einführung der EnEV 2002 zu berücksichtigen sind und mit Anwendung des Niedrigstenergiestandards einen relevanten Einfluss nehmen.

Je nach Ausführungs- und Konstruktionsart muss ein rechnerischer Anteil der Wärmebrückenverluste am Transmissionswärmeverlust H_T der wärmeübertragenden Umfassungsflächen kalkuliert und bei der Ermittlung des Jahresprimärenergiebedarfs berücksichtigt werden. Der pauschale Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB}

darf angesetzt werden, wenn die Ausführung der Bauteilanschlüsse nach DIN 4108 Beiblatt 2 erfolgt. Sie ersetzen demnach eine detaillierte und aufwendige Berechnung aller Wärmebrücken, wirken sich aber besonders beim Niedrigenergiestandard sehr ungünstig auf die Bilanzierung aus. Zudem können im reinen Holzbau meist ohne erheblichen konstruktiven Mehraufwand und bei genauem Nachweis oftmals ΔU_{WB} -Werte gleich oder nahe Null nachgewiesen werden.

Für ausgesuchte Anschlussdetails aus den gesammelten Beispielprojekten (siehe Kapitel 4 und 5.3) sowie den im Planungsworkshop entwickelten Regeldetails (siehe Anhang 2, Konstruktionskatalog) wurden außenmaßbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e auf Basis der DIN EN ISO 10211, DIN EN ISO 13370 und DIN EN ISO 13789 als Grundlage für einen EnEV-Nachweis ermittelt und angegeben. Auf Grundlage der Praxisbeispiele wurden zusätzlich Parameterstudien zu den Anschlüssen Wand/Bodenplatte, Wand/Geschossdecke und Wand/Flachdach durchgeführt. Beispielsweise wurde der Einfluss des Einstellgrades bei der eingestellten Variante oder der Stahlbetondeckenstärke bei gleichbleibendem U-Wert bewertet. Die abgeleiteten Konstruktionsregeln können Kapitel 5.3.5 entnommen werden. Grundsätzlich bewegen sich die Werte der untersuchten außenmaßbezogenen Wärmebrückenkoeffizienten für Geschossdeckenstöße je nach Konstruktionsausführung und Dämmstandard zwischen 0,024 W/m²K und 0,102 W/m²K. Es wird deutlich, dass die Konstruktionsausführung einen relevanten Einfluss auf den Wärmeschutz haben kann.

6.1.4 Schallschutz

Der Schallschutz im Hochbau ist in Deutschland wegen der zunehmend verdichteten Bauweise und den innerstädtisch vorhandenen hohen Außenlärmbelastungen ein wesentliches Kriterium zur Schaffung eines gesunden Wohn- und Arbeitsumfelds. Zur Quantifizierung werden Anforderungen und Zielwerte sowie Nachweisverfahren und ein Rechenbeispiel nach der aktuell verabschiedeten Norm DIN 4109 für die Anwendung der Hybridbauweise in einem Bürogebäude angegeben. (siehe Kapitel 2.9)

Aufgrund von Wissenslücken bei der Flankenschalldämmung wurden umfangreiche Versuche am ift Rosenheim Abteilung Bauakustik durchgeführt. Der additive Aufbau der Holzrahmen- bzw. Holztafelbauelemente ermöglichte eine Unterscheidung in die Bereiche Fassade, Kernelement und Installationsebene. In Abhängigkeit von vorgestellter oder eingestellter Variante erfolgten Messungen zur Auswirkung von Fugenausführungen, verschiedener Arten von Installationsebenen und der Kopplung der raumtrennenden Elemente durch ein Wärmedämmverbundsystem. Die Schalldämmwerte wurden an vertikalen und horizontalen Anschlussfugen ermittelt. (siehe Kapitel 5.4)

Ein Abgleich der Versuche zeigt, dass die Bauweise prinzipiell zum Einsatz in Mehrfamilienwohnhäusern, die den Mindestanforderungen an den Schallschutz in Deutschland (DIN 4109-1, 2016), aber auch einem erhöhten Schallschutz nach VDI 4100 mit SSt I und SSt II unterliegen, geeignet ist. Die Zielwerte für die SSt III nach VDI 4100 können nicht bzw. nur in Einzelfällen erreicht werden, wobei hier anzumerken ist, dass ein Nachweis der SSt III im mehrgeschossigen Wohnungsbau auch eine entsprechend hochschalldämmende Ausführung der Trennbauteile mit $R_w \geq 71$ dB erfordert. Dies bedeutet ebenfalls einen sehr hohen Aufwand bei den trennenden Stahlbetonbauteilen. (siehe Kapitel 5.4)

Durch die additive Ausführung können auch erste schallschutztechnische Rückschlüsse auf verdeckt ausgeführte Anschlüsse gezogen werden, u.a. erfolgte der Einbau von Fugendichtbändern. Wenn bei dieser Variante neben den schallschutztechnischen auch die brandschutztechnischen Anforderungen im Bereich der Montagefuge eingehalten werden, können zusätzliche Arbeitsschritte entfallen, z.B. die untere und obere Abklebung der Fuge.

6.1.5 Brandschutz

Ein wichtiger Aspekt ist die nichttragende Eigenschaft der Außenwandelemente, die eine Anwendung der Holzbauelemente nach bauordnungsrechtlichen Vorgaben bis zur Hochhausgrenze (Höhe oberster Geschossfußboden gegenüber mittlerer Geländehöhe ≤ 22 m) ermöglicht. Der Anwendungsbereich ergibt sich aus der Muster-Bauordnung (MBO) bzw. den jeweiligen Landesbauordnungen (LBOs). (siehe Kapitel 2.8)

Aus den baurechtlichen Vorgaben resultiert eine Variation der Feuerwiderstandsdauer von tragenden und raumabschließenden Bauteilen von 30 Minuten (GKL 3) bis 90 Minuten (GKL 5) zu den nichttragenden Holzfassadenelementen mit einem geforderten Feuerwiderstand von 30 Minuten (GKL 3 bis 5). Für den maßgebenden Fall, d.h. den Nachweis des Anschlusses an eine Decke oder Trennwand mit einem Feuerwiderstand von 90 Minuten, wurde der brandschutztechnische Nachweis auf Grundlage von experimentellen Forschungsergebnissen geführt. (siehe Kapitel 6.5) Die Betrachtungen zeigen, dass die Anschlüsse die Anforderungen gemäß § 28 MBO einhalten, so dass eine Brandausbreitung auf und in den Außenwandbauteilen ausreichend lang begrenzt ist.

6.1.6 Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Die Verwendung von Holzfassadenelementen an Stahlbetontragkonstruktionen bietet die Möglichkeit für einen erweiterten Einsatz des heimischen, nachwachsenden Rohstoffes Holz. Vor dem Hintergrund zunehmend auftretender Rohstoffknappheit und der Abhängigkeit vom Rohstoffimport eröffnen sich hier große Chancen für eine langfristig valide Bauweise. Die Hybridbauweise wurde hinsichtlich ihres Lebenszyklus qualitativ zum Thema Rückbaubarkeit und Recyclingfähigkeit (siehe Kapitel 2.12.2) und quantitativ in einer Ökobilanz untersucht (siehe Kapitel 2.12.3 und 4.2.3).

Die Beurteilung der zukünftigen Nachnutzung nach dem Ende der Nutzungsdauer eines Gebäudes findet grundsätzlich auf zwei Ebenen statt: Verwendete Konstruktionsweisen sind für die Rückbaubarkeit ausschlaggebend und Voraussetzung für eine Rückgewinnung der im Gebäude verwendeten Materialien, während die Materialwahl für die Rezyklierbarkeit wesentlich ist. Die Prinzipien der Planung für ein rückbaubares und rezyklierfähiges Gebäude lassen sich auf wenige Grundsätze zusammenfassen:

- Gebäudeteile oder Gruppen von Gebäudeteilen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern sollten leicht voneinander trennbar sein. Hier leisten hybride Bauweisen einen entscheidenden Beitrag, da die Fassade in der Regel eine kürzere Nutzungsdauer aufweist als das Tragwerk, so dass ihre Austauschbarkeit die Flexibilität eines Gebäudes erhöht.
- Bauteilschichten mit kürzerer Lebensdauer sollten ausgetauscht werden können, ohne dass dabei Bauteilschichten mit längerer Lebensdauer beeinflusst werden. Gleichzeitig sollten Bauteilschichten leicht voneinander lösbar sein, um eine sortenreine Trennung der Materialien beim Rückbau des Gebäudes zu gewährleisten.
- Nachwachsende Rohstoffe eignen sich für eine Kaskadennutzung, d.h. eine Nutzung in zunehmend minderwertiger Qualität. Zum Beispiel können Holzbalken zu Holzwerkstoffplatten recycelt werden, die nach Ende ihrer Nutzungsdauer zur Energiegewinnung verbrannt werden. Sie können komplett in einem ökologischen Kreislauf geführt werden, solange sie nicht durch Fremdstoffe verunreinigt sind.

- Nicht nachwachsende Rohstoffe mit einem hohen Recyclingpotenzial sind fossilen Materialien unbedingt vorzuziehen, die nur in minderwertiger Form (Downcycling) wiederverwendet können oder deponiert werden müssen.

Um über „weiche Faktoren“ hinaus die ökologischen Vorteile der Hybridbauweise darzustellen, wurden zunächst die Außenwände der Beispielfassaden mit Hilfe einer Ökobilanz im Vergleich zu Standardwandaufbauten in Massivbauweise und zu einer Aluminium-Vorhangsfassade untersucht. (siehe Kapitel 4.2.3) Alle Fassadenaufbauten und die Ergebnisse der Ökobilanz der Beispielprojekte können im Kapitel 5.6 detailliert nachgelesen werden.

Auf der Grundlage der Beispielprojekte wurden in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss Standardaufbauten entwickelt, die hinsichtlich der gewählten Baustoffe in einer weiteren Ökobilanz analysiert wurden. Die Berechnung der Ökobilanzen nach ÖkobaDat 2011 erfolgte mit Hilfe des vom BBSR entwickelten Tools eLCA (BBSR, o.J.). Die Ergebnisse wurden jeweils für 1 m² Fassadenfläche und einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt und beinhalten alle Bauteilschichten und ggf. statisch erforderliche Befestigungsmittel, aber nicht den Betriebsenergiebedarf, da dieser für ein Einzelbauteil nicht sinnvoll ermittelt werden kann.

Der Vorteil der nachwachsenden Rohstoffe bildet sich besonders in zwei Indikatoren der Ökobilanz ab: Dem erneuerbaren Primärenergieinhalt und dem Treibhauspotenzial. Hier konnte nachgewiesen werden, dass eine Fassade in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise bis zu 100% nicht erneuerbare Primärenergie im Vergleich zu einer Fassade in Massivbauweise einsparen kann, und gegebenenfalls sogar darüber hinaus eine Primärenergie-Gutschrift aufgrund der Verdrängung von nicht erneuerbaren Energien aus dem Energie-Mix erhält. Hinsichtlich des Treibhauspotenzials wurde errechnet, dass die mineralischen Außenwände und die Aluminium-Vorhangsfassade mindestens 3,5-mal so viel Treibhauspotenzial über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wie die Holzrahmenbau-Außenwände verursachen. (siehe Kapitel 4.2.3)

Der Vergleich macht deutlich, dass U-Wert und Ökobilanz-Ergebnisse voneinander weitgehend unabhängig sind. Das heißt, Holzrahmenbaufassaden bieten besonders bei Verwendung ökologisch vorteilhafter Dämmstoffe die Chance, Primärenergiebedarf und Umweltwirkungen parallel in allen Lebenszyklusphasen zu verringern, das heißt, eine Verringerung des Energiebedarfs im Betrieb ist ohne eine Erhöhung des Energiebedarfs für die Herstellung möglich. Als Bauteilkomponente für den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt und das Treibhauspotenzial ist das Kernelement ausschlaggebend, gefolgt von der Fassade. Die Installationsebene ist aufgrund des geringen Materialaufwandes weniger relevant, die Befestigungselemente fallen am geringsten ins Gewicht.

Ein Nebeneffekt der Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise ist ihr besserer U-Wert bei gleicher Wandstärke. (siehe Kapitel 6.1.3) Damit kann entweder Nutzfläche bei gleichem umbautem Raum gewonnen oder Energieeinsparungen und geringere Umweltwirkungen während des Gebäudebetriebs erreicht werden. An einem Praxisprojekt im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde gezeigt, dass Tragwerk und Hülle der Hybridbauweise im Vergleich zur Massivbauweise insgesamt 13 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie verbrauchen und 7% weniger Treibhauspotenzial verursachen (TUM, 2015).

6.1.7 Konstruktionskatalog

Für den gesamten Bauprozess, zu dem die Gestaltung des Bauwerks, die Konstruktion und der Bauablauf zu zählen sind, bildet die Entwurfsplanung die entscheidende Phase, in der Problemlösungsvorgänge der Vorplanung zusammengefasst und für die Folgephasen vorbestimmt werden. In dieser Phase werden Kosten, Zeit und Qualität bestimmt und nachhaltig beeinflusst.

Der standardisierte Konstruktionskatalog für die Anwendung von vorgefertigten Holzrahmen- bzw. Holztafelbauelementen als Fassadenhüllkonstruktion von hybriden Stahlbetonhochbauwerken stellt hierzu geeignete Lösungen für die Phase der Entwurfs- und Ausführungsplanung zur Verfügung und schließt bisher vorhandene Wissenslücken. In dem Konstruktionskatalog sind wesentliche Bauteilaufbauten und Anschlussausführungen der vorgestellten und teilweise eingestellten Variante aufgeführt. (siehe Anhang 2)

Ergänzend zum Katalog kann der Abschlussbericht herangezogen werden, welcher Hintergrundinformationen sowie ein Verständnis zur Einschätzung der statischen, bauphysikalischen und ökologischen Faktoren gibt. Dem Leser und Anwender der beiden Publikationen (Abschlussbericht und Konstruktionskatalog) eröffnet sich die Möglichkeit ein optimiertes Gebäude in Hybridbauweise bis zur Hochhausgrenze zu planen und auszuführen.

Durch die Anwendung des Konstruktionskataloges und Umsetzung weiterer Projekte wird eine weitere Standardisierung und Beschleunigung der Planungs- und Bauabläufe sowie eine noch weiter verbesserte Qualitätssicherung erwartet.

6.2 Ausblick

Aus der Bearbeitung des Vorhabens haben sich weitere Optimierungsansätze auf Konstruktions- und Planungsebene ergeben. Auf Konstruktionsebene können weitere Überlegungen zur Schnittstelle der Holzfassadenelemente erfolgen, u.a. kann die Kombination von Holzfassadenelementen an Holz-Beton-Verbundelemente bzw. -decken unter Verwendung von Holz-Holz-Verbindung untersucht werden.

Die wirtschaftlichen und zeitlichen Vorgaben können nur eingehalten werden, wenn der Ablauf von Fertigungs- und Montageprozessen in der der Planung berücksichtigt wurde. (siehe Kapitel 3)

In dem Vorhaben wurde davon ausgegangen, dass die Elemente an ein bereits erstelltes Stahlbetonhochbauwerk angebracht werden. Die Taktung der Bauprozesse, u.a. die geschossweise Errichtung des Stahlbetontragwerks und der Holzfassadenelemente ist ein wichtiger Schritt zur weiteren Rationalisierung der untersuchten Hybridbauweise.

Aus ökologischer Sicht bieten Holzrahmen- bzw. Holztafelbauelemente vielfache Vorteile (siehe Kapitel 4.2.3 und 5.6.2) Diese sind derzeit allerdings nicht in allen Ergebnissen von Ökobilanzen sichtbar, da nachwachsende Rohstoffe noch relativ unvoreilhaft bewertet werden: Nicht nur wird ihnen die erneuerbare Energie als Energieinhalt in der Herstellung zugeteilt, die die Pflanze für das Wachstum benötigt, sondern sie werden im End-of-Life Szenario der Verbrennung zur Energiegewinnung zugeführt, so dass für die Nachnutzung Kohlendioxidemissionen berechnet werden (siehe Kapitel 4.2.3). Dadurch wird der Vorteil, dass sich Holz für eine Kaskadennutzung besonders gut eignet (siehe Kapitel 2.12.2), nicht widergespiegelt. Weiterer Forschungsbedarf besteht daher in der umfassenden ökologischen Bewertung von Holz und nachwachsenden Rohstoffen, welche die Tatsache mit einbezieht und bewertet, dass es sich um einen erneuerbaren Rohstoff handelt. Ein erster Schritt ist die Einbeziehung der Bewertungskriterien Ressourcenverbrauch (z.B. das Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADPE) (früher: Abiotic Depletion Potential) oder das Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADPF)) in die neueren Versionen der Ökobaudat (seit 2013). Dies erlaubt auch in diesen Kategorien ein Erzeugen von Erfahrungswerten. Darüber hinaus ist eine weitere Differenzierung der Nachnutzungsmöglichkeiten von in Gebäuden verbauten Rohstoffen und deren Bewertung in Ökobilanzen ein weiteres Forschungsgebiet. Die Aktualisierung der Ökobilanz-Ergebnisse auf der Grundlage der neuen Ökobaudat 2016 (herausgegeben am 24.05.2016) muss vorgenommen werden.

Auch hinsichtlich Rückbaubarkeit können vorgefertigte Fassadenelemente in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise einen wichtigen Beitrag liefern (siehe Kapitel 2.12.2). Diesen Vorteil detaillierter zu analysieren und ökologisch und ökonomisch zu quantifizieren, wird in naher Zukunft vor dem Hintergrund von Ressourcenknappheit und steigender Weltbevölkerung an Bedeutung gewinnen.

Einen weiteren Arbeitsschritt stellt die Validierung des Konstruktionskatalogs durch die Praxis dar. Der Katalog ist in seiner Anwendbarkeit zu bewerten und sollte nach Möglichkeit mit neuen Erkenntnissen ergänzt und fortgeführt werden. Vor allem die Weiterführung des Wärmebrückenkatalogs ist hier aufzuführen.

Zur Stärkung der Praxisanwendung ist die wissenschaftliche Begleitung weiterer Hybridbauprojekte essentiell (vgl. u.a. (TUM, 2015)). Denn die Evaluierung der Planungsprozesse und des Bauablaufs bildet die Grundlage für eine stetige Qualitätsoptimierung in der Bauausführung. Ferner sind die Schallschutzuntersuchungen auf weitere Konstruktionsvarianten auszuweiten, um belastbare Standardwerte zu erhalten. In-Situ-Messungen können dabei unterstützend wirken.

7 Literatur

Materielle Literatur

- Ackermann, K. (1993). *Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren*. Stuttgart: Karl Krämer.
- BMVBS. (2013). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Berlin: BMVBS.
- Brand, S. (1994). *How Buildings Learn*. New York: Viking Penguin.
- Brenner, V. (2010). *Recyclinggerechtes Konstruieren - Konzepte für eine Abfallfreie Konstruktionsweise im Bauwesen*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren.
- Bundesregierung. (2012). *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie - Fortschrittsbericht 2012*. Berlin: Bundes- und Informationsamt der Bundesregierung.
- DAfStb-Heft 240. (1992). Heft 240 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton: *Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken*. 3.Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DAfStb-Heft 600. (1992). *Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DGNB. (2015a). Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. *DGNB Kriterium ENV1.1 Ökobilanz – Emissionsbedingte Umweltwirkungen. Kriterienkatalog Neubau Büro und Verwaltungsgebäude*. Version 2015.2. Online anfordern unter <http://www.dgnb.de/de/services/kriterienanforderung/>.
- DGNB. (2015b). Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. *DGNB Kriterium TEC 1.6. Rückbau und Recyclingfreundlichkeit. Kriterienkatalog Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude*. Version 2015.2. Online anfordern unter <http://www.dgnb.de/de/services/kriterienanforderung/>.
- DIN e.V. (2012). Deutsches Institut für Normung e.V. & Internationaler Verein für Technische Holzfragen (Hrsg.) *Holzschutz: Praxiskommentar zu DIN 68800 Teile 1 bis 4*. (2. Auflage). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dinger, B. (2012). *DIN 68800 Holzschutz in der Praxis: Überblick mit Tiefgang, Konstruktiv vorbeugen, Holz zerstörende Pilze und Insekten*. mikado plus, 2012/09.
- El khouli, S.; John, V.; Zeumer, M. (2014). *Nachhaltig Konstruieren*. München: Detail Green Books.
- Fingerloos, F. (2006). *DBV Merkblatt Betonschalungen und Ausschallfristen, Fassung September 2006*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V.
- Fischer O.; Sauer J. (2013). *Sustainability considerations for tunnel projects: Research and Applications in Structural Engineering*. Mechanics & Computation. Proceedings of the Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics & Computation, S.883-884.
- Frank, W. (1975). *Raumklima und Thermische Behaglichkeit*. Berichte aus der Bauforschung, Heft 104. Berlin: Ernst & Sohn Verlag

holzbau handbuch R03 T03 F 04. (2004). *Schallschutz - Wände und Dächer*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn, München: Holzabsatzfonds, DGfH (Hrsg.).

holzbau handbuch R 01 T01 F 07. (2009). *Holzrahmenbau*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn: Holzabsatzfonds (Hrsg.).

holzbau handbuch R01 T01 F05. (2006). *Holzkonstruktionen in Mischbauweise*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn: Holzabsatzfonds (Hrsg.).

holzbau handbuch R01 T01 F08. (2004). *Funktionsschichten und Anschlüsse für den Holzhausbau*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn, München: Holzabsatzfonds, DGfH (Hrsg.).

holzbau handbuch R01 T02 F04. (2009). *Energieeffiziente Bürogebäude*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn: Holzabsatzfonds (Hrsg.).

holzbau handbuch R01 T03 F10. (2002). *Das Passivhaus – Energie-Effizientes-Bauen*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. München, Bonn: DGfH, Holzabsatzfonds (Hrsg.).

holzbau handbuch R03 FT02 F07. (2008). *Wärmebrücken*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn: Holzabsatzfonds (Hrsg.).

holzbau handbuch R04 T05 F02. (2012). *Holzfaserdämmstoffe: Eigenschaften – Anforderungen – Anwendungen* (2. Überarbeitung). INFORMATIONSDIENST HOLZ. Wuppertal: Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V. (Hrsg.).

holzbau handbuch R04 T05 F03. (2013). *Holzfaser-Wärmedämmverbundsysteme: Eigenschaften – Anforderungen – Anwendungen* (3. Überarbeitete Auflage). INFORMATIONSDIENST HOLZ. Wuppertal: Verband Holzfaser Dämmstoffe e.V. (Hrsg.).

Horn, G. (2011). *Passivhäuser in Holzbauweise: Planen, Bauen, Betreiben*. Köln: Bruderverlag GmbH.

Jungmann, U.; Lambrecht, K. (2014). *EnEV 2014 im Bild: Praxisgerecht kommentiert und grafisch umgesetzt* (1. Auflage). Köln: Rudolf Müller.

Kolb, J. (2007). *Holzbau mit System*. Birkhäuser Verlag AG.

König, H. (2014). *Erstellung von Ökobilanzen*. In: Cheret, P., Schwaner, K., Seidel, A. (Hrsg.). *Urbaner Holzbau Handbuch und Planungshilfe*. Berlin: DOM Publishers.

Li. (2015). *Empfehlung zur Betonbettung*. E-Mail von Dr. Li, Anchor Profi GmbH Stuttgart

Löbus, S.; Werther, N.; u.a. (2014) *SmartTES - Innovation in timber construction for the modernisation of the building envelope - Book 5 Fire safety*. Technische Universität München - Fakultät für Architektur.

Marquardt, H. (2014). *Energiesparendes Bauen: Ein Praxisbuch für Architekten, Ingenieure und Energieberater Wohngebäude nach EnEV 2014 und EEWärmeG* (2. Auflage). Frankfurt am Main: Beuth Verlag GmbH.

- Merk, (2015). *Untersuchungsbericht Belastungsversuche zur Bestimmung der Verschiebesteifigkeiten an Wand-Decken Verbindungselementen*. Prüfstelle Holzbau, MPA Bau TU München
- Mette, E. (2014). *Transportieren und Montieren*. Holzbau - die quadriga, 2014/03, 23-27.
- Niemz, P. (2006). *Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenbehandlung auf die Wasseraufnahmekoeffizienten von Fichtenholz*. Holz, Mering.
- Oesterheld, R.; Beck, M. (2014). *Expositionsklassen für Betonbauteile im Geltungsbereich des EC2: Zement-Merkblatt Betontechnik B9 9.2014*. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.).
- Peper, S.; Feist, W.; Sariri, V. (2003). *Luftdichte Projektierung von Passivhäusern – Eine Planungshilfe* (6. Auflage). Passivhaus Institut.
- Projektbericht Nr. 14-001534-PR01(PB-F02-04-de-01) (2015). *Bestimmung der Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f}$ einer Außenwand in Holztafelbauweise nach DIN EN ISO 10848-2:2006-08, Bewertung nach DIN EN ISO 717-1:2013-06 Bestimmung des Stoßstellendämm-Maßes K_{ij} einer Stoßstelle zwischen einer Trenndecke in Massivbauweise und einer Außenwand in Holztafelbauweise nach DIN EN ISO 10848-1:2006-08, Bewertung nach DIN EN ISO 10848-1:2006-08 Bestimmung des Norm-Trittschallpegels L_n einer Betondecke mit schwimmendem Estrich und flankierender Holzständerwand nach DIN EN ISO 10140-3:2010-12, Bewertung nach DIN EN ISO 717-2:2013-06* - Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Fassadenelemente für Hybridbauweisen“ der Lehrstühle Holzbau und Baukonstruktion, energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen sowie Massivbau. Rosenheim: ift Rosenheim.
- Quast, U. (2010). *Zur Auswahl eines geeigneten Verfahrens für die Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug*. Bautechnik, 2010/07, 397-403.
- Rüter, S.; Diederichs, S. (2012). *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. Abschlussbericht. Hamburg: Johann Heinrich von Thünen Institut.
- Schleifer, V. (2009). *Zum Verhalten von raumabschließenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall*. Dissertation. Zürich: ETH Zürich.
- Schneider, P.; Pfoh, S.; Grimm, F. (2015). *Projektplattform Energie: Leitfaden 01, Ökologische Kenndaten, Baustoffe und Bauteile*. München: Technische Universität München. Online erhältlich unter: http://www.ppe.tum.de/fileadmin/w00bqx/www/content_uploads/151016_Leitfaden_OEkologische_Kenndaten.pdf.
- Scholl, W.; Bietz, H. (2005). *Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109*. Abschlussbericht. PTB, Braunschweig.
- Schopbach, H. (2014). *Grundwissen moderner Holzbau: Praxishandbuch für den Zimmerer* (1. Auflage). Köln: Bruderverlag Albert Bruder GmbH & Co. KG.
- SIA. (2009). Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.). *SIA Merkblatt 2032, Ausgabe 2010. Graue Energie von Gebäuden*. Zürich: Verlag SIA.
- Sölkner, P. J.; Oberhuber, A.; Spaun, S.; Preininger, R.; Dolezal, F.; Mötzl, H. et al. (2014). *Innovative Gebäudekonzepte im ökologischen und ökonomischen Vergleich über den Lebenszyklus*. Bundesministeri-

um für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien: Projektbericht im Rahmen des Programms Haus der Zukunft.

Teibinger, M.; Müllner H. (2005). *Schall-Längsleitung im Holz-Mischbau*. Bauphysik 27, S. 268.

Untersuchungsbericht CV-231168829. (2016). *Großformatige Bauteilversuche hinsichtlich Biegung, Querkraft und Torsion unter Dauerlast - Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Fassadenelemente für Hybridbauweisen der Lehrstühle Holzbau und Baukonstruktion, energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen sowie Massivbau“*. München: TUM MPA BAU – Abteilung Massivbau / Lehrstuhl für Massivbau.

TUM. (2015). Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen & Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. *Städtischer Hartplatz Penzberg*. Endbericht. München: Technische Universität München.

VBS. (2007). Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport. *Technische Weisung Beurteilung von Energiesystemen und Energiesparmaßnahmen: Einführung/ Programmbeschreibung und standardisierte Nutzungszeiten von Gebäuden/ Bauteilen*. Bern: armasuisse Immobilien.

VDZ. (2008a). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V (Hrsg.). *Arbeitskreis Marktforschung: Baustoffverbrauch in Eigenheimen*. Berlin.

VDZ. (2008b). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V (Hrsg.). *Arbeitskreis Marktforschung: Baustoffverbrauch in Nicht-Wohnbauten*. Berlin.

VDZ. (2009). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V (Hrsg.). *Arbeitskreis Marktforschung: Baustoffverbrauch in Nicht-Wohnbauten*. Berlin.

Weege, R.-D. (1981). *Recyclinggerechtes Konstruieren*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Wegener, G.; Pähler, A.; Tratzmiller, M. (2010). *Bauen mit Holz*. München: Holzforschung München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Technische Universität München.

Willems, W. (2010). 10A Bauphysik. In: A. Goris (Hrsg.). *Bautabellen für Ingenieure: mit Berechnungshinweisen und Beispielen* (19. neubearbeitete und erweiterte Auflage), 10.2-10.78. Unterschleißheim: Werner Verlag München.

Zeumer, M.; John, V.; Hartwig, J. (2009). *Nachhaltiger Materialeinsatz – Graue Energie im Lebenszyklus*. Detail Green 1, 2009, S. 54-60.

Zilch, K. & Zehetmaier, G. (2010). *Bemessung im konstruktiven Betonbau* (2.Auflage). Berlin: Springer Verlag.

Zimmerman, J. (2005). *Vorlesungsskript Grundkurs Bauprozessmanagement*. München: Technische Universität München, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung.

Jaccoud, Jean-Paul; Favre, Renaud. (1982). *Flèche des structures en béton armé - Vérification expérimentale d'une méthode de calcul*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de Statique et Structures Béton Armé et Précontraint. Lausanne.

Immaterielle Quellen

AltholzV. (2002). Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz vom 15.08.2002. Abgerufen am 7.2.2016 von http://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/anhang_iii.html.

Baunetz. (o.J.). Baunetz Wissen, Nachhaltig Bauen, Glossar: Definition Graue Energie. Abgerufen am 2.7.2015 von http://www.baunetzwissen.de/glossar_begriffe/Nachhaltig-Bauen-Graue-Energie_664290.html.

Baupraxisblog. (o.J.a). Kurioses von 2011. Abgerufen am 03.06.2014 von <http://i2.wp.com/www.baupraxis-blog.de/wp-content/uploads/2011/06/Fundamentfehler.jpg>.

Baupraxisblog. (o.J.b). Kurioses von 2012. Abgerufen am 03.06.2014 von <http://i1.wp.com/www.baupraxis-blog.de/wp-content/uploads/2012/04/Schiefes-Haus-aus-Holz.jpg>.

BBSR. (2011). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB.) Abgerufen am 17.06.2014 von http://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen__2011-11-03.pdf.

BBSR. (o.J.). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. eLCA. www.bauteileditor.de.

Beton. (2011). Das Portal für Bauprofis. Betonarten in Deutschland. Abgerufen am 21.03.2015 von <http://www.beton.de/betonarten-in-deutschland>.

BMUB. (o.J.). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (o.J.). Informationsportal Nachhaltiges Bauen Ökobaudat. www.oekobaudat.de.

BMUB. (o.J.). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, ByAK Bayerische Architektenkammer (o.J.). wecobis (ökologisches Baustoffinformationssystem). Abgerufen am 10.01.2016 von <http://www.wecobis.de/service/lexikon/recycling-lex.html>.

BNE-Portal. (o.J.). Nachhaltigkeitsbegriff. Abgerufen am 12.06.2014 von <http://www.bne-portal.de/was-ist-bne/grundlagen/nachhaltigkeitsbegriff>.

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg.) (2015). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012 Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012. Berlin. Abgerufen am 22.06.2015 von <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-9.pdf>.

UNEP. (o.J.). Common Carbon Metric. Abgerufen am 20.05.2016 von www.unep.org/sbci/pdfs/UNEPSBCICarbonMetric.pdf

DEGA BR 0101, "Die DIN 4109 und die allgemein anerkannten Regeln der Technik in der Bauakustik", Memorandum des DEGA Fachausschuss Bau- und Raumakustik, 2005, www.dega-akustik.de

Deutscher Bundestag. (1998). Enquete Kommission: Schutz des Menschen und der Umwelt, Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung. Abgerufen am 29.02.2016 von <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/13/112/1311200>.

Literatur

Deutsches Architektur Forum. (o.J.). Architektur, Städtebau und Bauwesen: Regionale Themen. Norden. Barlachstadt Güstrow: Bauprojekte und Stadtplanung. Abgerufen am 22.06.2015 von deutsches-architektur-forum.de/forum/showthread.php?p=411070.

Ecoinvent. (o.J.). ecoinvent LCI database. <http://www.ecoinvent.org/>. energie-m. (2014). Passivhaus. Abgerufen am 12.06.2014 von <http://www.energie-m.de/info/passivhaus.html>.

Energiesparmobil. (o.J.). Thermische Behaglichkeit. Abgerufen am 11.06.2014 von http://www.energiesparmobil.de/bilder/dach_waende_fenster/10_03_thermische_behag.jpg.

Hauser, G. (2014). Künftige Entwicklung der Gebäude in energetischer Hinsicht. Abgerufen am 29.02.2016 von http://www.waermeschutztag.de/media/pdf/wtag2014/Kuenftige_Entwicklung_der_Gebaeude_in_energetischer_Hinsicht.pdf.

IBU. (2009). Institut Bauen und Umwelt e.V. (2009). Umwelt-Produktdeklaration Kronotherm. Holzfaserdämmung Deklarationsnummer EPD-KRO-2009212-D. Abgerufen am 8.12.2015 von http://bau-umwelt.de/download/CY1c67a99eX13aab7d9717X7d97/EPD_KRO_2009212_D.pdf.

IBU. (o.J.). Institut für Bauen und Umwelt (o.J.). Web-Plattform baubook. <https://www.baubook.info/>.

KETONIA GmbH. (o.J.). Ketonía Spannbeton-Fertigdecken. Abgerufen am 16.04.2016 von <http://www.ketonia.de/spannbeton-fertigdecken.html>.

Komzet. (2011). Komzet Bau Bühl Kompetenzzentrum der Bauwirtschaft (Hrsg.). Transport von Bauteilen

KVH (o.J.). Sortimente und Vorzugsquerschnitte für Fichte/Tanne NSi. Abgerufen am 09.11.2015 von <http://www.kvh.eu/konstruktionsvollholz-kvh/weitere-eigenschaften-kvh/verfuegbare-querschnitte-und-laengen/>.

PE International. (2011). Methodische Grundlagen Ökobilanzbasierte Umweltindikatoren im Bauwesen, Version 2 – 9.12.2011. Abgerufen am 14.07.2014 von http://www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/oekobaudat2011/Methodische_Grundlagen_09.08.2012.pdf.

PE International. (2013). Erläuterungsdokument zur Ökobaudat 2013. Abgerufen am 21.10.2015 von www.oekobaudat.de/fileadmin/downloads/oekobaudat2013/OEKOBAU.DAT_2013_Erlaeuterungsdokument_2013-08-15.pdf.

PERI GmbH. (o.J.). Deckenschalungen. Abgerufen am 19.06.2014 von <http://www.peri.de/produkte/schalungssysteme/deckenschalungen.html>.

ProgRess. (2015). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II (2015). Fortschrittsbericht 2012 –2015 und Fortschreibung 2016 –2019. Abgerufen am 6.2.2016 von www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_II_broschuere_de_bf.pdf.

Schöck Bauteile GmbH. (2015). Bauphysik-Handbuch. Grundlagen des Wärmeschutzes. Abgerufen am 10.07.2015 von https://www.schoeck.de/upload/files/download/Bauphysik_Handbuch_Grundlagen_des_Waermeschutzes%5B5208%5D.pdf.

Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. (o.J.). Standardbauteile. Abgerufen am 09.11.2015 von http://brettschichtholz.de/brettschichtholz-bs-holz/standardbauteile/mn_42529.

Suspa DSI. (o.J.). Spannverfahren ohne Verbund. Abgerufen am 16.04.2014 von <http://www.dywidag-systems.de/referenzen/details/article/parkhaus-rolandsweg-paderborn.html>.

Syspro-Gruppe Betonbauteile e. V. (o.J.). Elementwand. Abgerufen am 16.04.2014 von http://www.syspro.de/planung/e_wand.html.

UNFCCC. (o.J.). United Nations Framework Convention on Climate Change (o.J.). Global Warming Potentials. Abgerufen am 08.02.2016 von: http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php.

VDZ. (2003). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V (Hrsg.) (2003). Arbeitskreis Marktforschung, Baustoffverbrauch in Eigenheimen. Abgerufen am 11.03.2016 von [https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/bdz/Intern/Marktforschung/ZV_Hochb_2003.pdf?sword_list\[\]=PDF&no_cache=1&L=](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/bdz/Intern/Marktforschung/ZV_Hochb_2003.pdf?sword_list[]=PDF&no_cache=1&L=).

VDZ. (2009). Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V (Hrsg.) (2009). Arbeitskreis Marktforschung, Baustoffverbrauch in Nicht-Wohnbauten. Abgerufen am 11.03.2016 von [https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/bdz/Intern/Marktforschung/Baustoffverbrauch_NWB_2009.pdf?sword_list\[\]=PDF&no_cache=1&L=](https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/bdz/Intern/Marktforschung/Baustoffverbrauch_NWB_2009.pdf?sword_list[]=PDF&no_cache=1&L=).

VÖB & VÖZ (Hrsg.). (o.J.). Kellerwände und aufgehende Wände. Abgerufen am 16.04.2014 von http://www.wohnbeton.at/Material/bilder_gross/02_kellerwaende_und_aufgehende_waende/zeichnung_3_2_16_gross.gif.

Wikimedia Commons. (2013a). Railweh10: Schematische Darstellung des Zusammenhangs von Primär-, End- und Nutzenergie sowie der zugehörigen Umwandlungsverluste. Abgerufen am 12.10.2015 von commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiegruppen_Übersicht.png.

Wikimedia Commons. (2013b). Wien – Seestadt. Abgerufen am 22.06.2015 von commons.wikimedia.org/wiki/File:Wien_-_Seestadt,_SW-Areal_2013.JPG.

Wohnbeton. (2014). Doppelwände. Abgerufen am 16.04.2014 in http://www.wohnbeton.at/Material/bilder_gross/02_kellerwaende_und_aufgehende_waende/zeichnung_3_2_16_gross.gif.

Normen, Verordnungen und Zulassungen

BauPVO. (2011). *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates* (Amtsblatt der Europäischen Union L 88 vom 4. April 2011)

BGH. (2007). *Urteil vom 14.06.2007, VII ZR 45/06*. Oberlandesgericht Hamm.

BRL. (2015). *Bauregelliste A, B und C*. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik.

DIN 1045. (1988). *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Bemessung und Konstruktion*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18195-4. (2011). *Bauwerksabdichtungen - Teil 4: Abdichtungen gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18202. (2013). *Toleranzen im Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18203-3. (2008). *Toleranzen im Hochbau - Teil 3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 18540. (2014). *Abdichten von Außenwandfugen im Hochbau mit Fugendichtstoffen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108 Beiblatt 2. (2006). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108-10. (2008). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe – Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108-2. (2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108-3. (2012). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchtigkeit - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108-4. (2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchte-schutztechnische Bemessungswerte*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108-6. (2003). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4108-7. (2011). *Wärmeschutzverordnung und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie –Beispiele*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

- DIN 4108-8 Fachbericht. (2008). *Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Vermeidung von Schimmelpilzwachstum in Wohngebäuden*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109. (1989). *Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise. Bbl-1: Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren, Bbl-2: Hinweise für die Planung und Ausführung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-1. (2016). *Schallschutz im Hochbau: Teil 1: Mindestanforderungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-2. (2016). *Schallschutz im Hochbau: Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-31. (2016). *Schallschutz im Hochbau – Teil 31: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Rahmendokument*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-32. (2016). *Schallschutz im Hochbau - Teil 32: Eingangsdaten für den rechnerischen Nachweis des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-33. (2016). *Schallschutz im Hochbau - Teil 33: Eingangsdaten für den rechnerischen Nachweis des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Holz-, Leicht- und Trockenbau, flankierende Bauteile*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- DIN 4109-34. (2016). *Schallschutz im Hochbau – Teil 34: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog), Teil 3-4: Vorsatzkonstruktionen vor massiven Bauteilen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-35. (2016). *Schallschutz im Hochbau – Teil 35: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Elemente, Fenster, Türen, Vorhangfassaden*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-36. (2016). *Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Gebäudetechnische Anlagen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4109-4. (2016). *Bauakustische Prüfungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 68800-1. (2011). *Holzschutz - Teil 1: Allgemeines*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 68800-2. (2012). *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 68800-3. (2012). *Holzschutz – Teil 3: Vorbeugender Schutz von Holz mit Holzschutzmitteln*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 12207. (2000). *Fenster und Türen – Luftdurchlässigkeit – Klassifizierung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 12354-1. (2000). *Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Luftschalldämmung zwischen Räumen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

- DIN EN 12354-2. (2000). *Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Trittschalldämmung zwischen Räumen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 12354-3. (2000). *Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften. Luftschalldämmung gegen Außenlärm*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 12390. (2009). *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13162. (2015). *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13363. (2007). *Sonnenschutzvorrichtungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13369. (2013). *Allgemeine Regeln für Betonfertigteile*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13381-7. (2014). *Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 7: Brandschutzmaßnahmen für Holzbauteile*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13501-1. (2010). *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13501-2. (2010). *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13670. (2011). *Ausführung von Tragwerken aus Beton*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13829. (2001). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13963. (2014). *Materialien für das Verspachteln von Gipsplatten- Fugen – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 13986. (2015). *Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 15804. (2014). *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 15978. (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 1990. (2010). *Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 1991-1-1. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-1/NA/A1. (2015). *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. Änderung A1*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-2. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-3. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-4. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-4/NA. (2010). *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-5. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen - Temperatureinwirkungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-6. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-6: Allgemeine Einwirkungen, Einwirkungen während der Bauausführung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1991-1-7. (2010). *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1992-1-1. (2011). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1992-1-1/NA. (2013). *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1992-1-2. (2010). *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1992-1-2/NA. (2010). *Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1995-1-1. (2010). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1995-1-1/NA. (2013). *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1995-1-2/NA. (2010). *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 1995-1-2. (2010). *Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 206. (2014). *Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 300. (2006). *Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) - Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 410. (2011). *Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 520. (2009). *Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 10077. (2012). *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung Wärmedurchgangskoeffizient*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 10140. (2010). *Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen in Prüfständen; Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte, 2014-09; Teil 2: Messung der Luftschalldämmung, 2010-12; Teil 3: Messung der Trittschalldämmung, 2010-12; Teil 4: Messverfahren und Anforderungen, 2010-12; Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen, 2010-12*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 10211. (2008). *Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – detaillierte Berechnung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 10456. (2010). *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 10848. (2006). *Messung der Flankenübertragung von Luftschall und Trittschall zwischen benachbarten Räumen in Prüfständen. Teil 1: Rahmendokument. Teil 2: . Anwendung auf leichte Bauteile, wenn die Verbindung einen Einfluss hat. Teil 3: Anwendung auf leichte Bauteile, wenn die Verbindung wesentlichen Einfluss hat*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 12572. (2001). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit (ISO 12572:2001)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 13370. (2008). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren (ISO 13370:2007)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 13786. (2015). *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren*. Berlin: Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 13788. (2013). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 13789. (2008). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmeverlustkoeffizient – Berechnungsverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 140-14. (2004). *Leitfaden für besondere bauliche Bedingungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 14040. (2006). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 15148. (2003). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen (ISO 15148:2002)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 16283-1. (2014). *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 1: Luftschalldämmung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 16283-2. (2016). *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen am Bau - Teil 2: Trittschalldämmung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 6946. (1996). *Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 717. (2013). *Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung, Teil 2: Trittschalldämmung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599 Beiblatt 2. (2012). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Beiblatt 2: Beschreibung der Anwendung von Kennwerten aus der DIN V 18599 bei Nachweisen des Gesetzes zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (EEWärmeG)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-1. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-10. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-11. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 11: Gebäudeautomation*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-2. (2007). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-2. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezone*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-3. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 3: Nutzenergiebedarf für die energetische Luftaufbereitung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-4. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-5. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-6. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 6: Endenergiebedarf von Lüftungsanlagen, Luftheizungsanlagen und Kühlsystemen für den Wohnungsbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-7. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-8. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 8: Nutz- und Endenergiebedarf von Warmwasserbereitungssystemen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 18599-9. (2011). *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 9: End- und Primärenergiebedarf von stromproduzierenden Anlagen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN V 4108-6. (2003). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

EEG. (2005). *Energieeinsparungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 01.09.2005 (BGBl. I S.2684), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 04.07.2013 (BGBl. I S.2197) geändert worden ist*. Bundesrepublik Deutschland.

EnEV 2014. (2007). *Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 1a des Gesetzes vom 4. Juli 2013 (BGBl. I S. 2197) geändert worden ist*. Bundesrepublik Deutschland.

MBeVO. (2000). *Muster – Verordnung über den Bau und Betrieb von Beherbergungsstätten (Muster-Berherbergungsstättenverordnung – MBeVO)*. Fassung Dezember 2000, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Mai 2014.

MBO. (2002). *Musterbauordnung (MBO)*. Fassung November 2002, zuletzt geändert durch den Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012

MVStättVO. (2005). *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättVO)*. Fassung Juni 2005, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014.

Richtlinie 2010/31/EU. (2010). *Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)*. Europäische Union.

StVO. (2015). *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) in der Fassung des Inkrafttretens vom 26.09.2015. Letzte Änderung durch: Fünfzigste Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 15. September 2015. BGBl. I S. 1573 Art. 2, ausgegeben zu Bonn am 25. September 2015*. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.

StVZO. (2015). *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) in der Fassung des Inkrafttretens vom 11.03.2015. Letzte Änderung durch: Verordnung zur Änderung der Fahrpersonalverordnung, der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung und der Verordnung über den grenzüberschreitenden Güterkraftverkehr und den Kabotageverkehr vom 9. März 2015. BGBl. I Nr. 9 S. 243, ausgegeben zu Bonn am 9. März 2015*. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.

VDI 4100. (2012). *Schallschutz im Hochbau, Wohnungen, Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

VDI 4600. (2012). *Kumulierter Energieaufwand (KEA). Begriffe, Berechnungsmethoden*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

VDI 4600. (2013). *Kumulierter Energieaufwand Beispiele*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

VDI 2243. (2002). *Recyclingorientierte Produktentwicklung*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Verkehrsblatt. (2000). *Verkehrsblatt Dokument-Nr. B. 5756: Kennzeichnung von Ingenieurbauwerken mit beschränkter Durchfahrtshöhe über Straßen*. Dortmund: Verlag Borgmann GmbH Co. KG.

Software

Lawrence Berkeley National Laboratory THERM 7.3

Nemetschek Vectorworks 2015 SP2 R1 (64-Bit)

8 Abkürzungen

Tabelle 8-1: Baustoffspezifische Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BFU	Bau-Furniersperrholz
BSH	Brettschichtholz
DHF	diffusionsoffene und feuchtebeständige Holzfaser
EPS	Expandiertes Polystyrol
GF	Gipsfaser
GK	Gipskarton
GKF	Gipskarton-Feuerschutz
HBV	Holz-Beton-Verbund
HRB	Holzrahmenbau
HWS	Holzwerkstoff
KVH	Konstruktionsvollholz
LSL	Langspanholz (Laminated Strand Lumber)
MDF	Mitteldichte Faser
OSB	Oriented strand board
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan
TSD	Trittschalldämmung
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WLS	Wärmeleitstufe
XPS	Extrudiertes Polystyrol

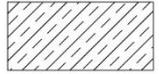
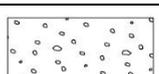
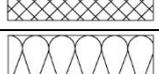
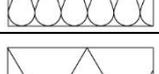
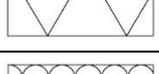
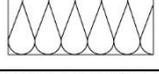
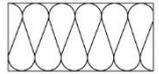
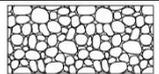
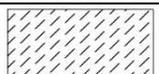
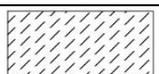
Tabelle 8-2: Definitionen

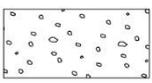
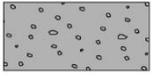
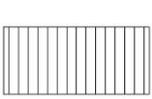
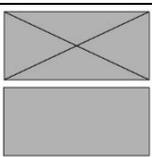
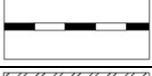
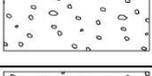
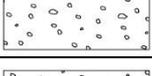
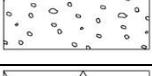
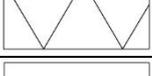
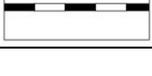
Abkürzung	Bedeutung
Bekleidung	Plattenelemente, welche dem räumlichen Abschluss der Systembereiche dienen
Beplankung	Plattenelemente, welche dem räumlichen Abschluss der Systembereiche dienen sowie die Funktion der Aussteifung übernehmen
Systembereiche	Aufteilung des mehrschichtigen Aufbaus einer Holzrahmenbauwand in unterschiedliche Funktionen (Fassade, Kernelement, Installationsebene)

9 Anhang

Anhang 1: Randbedingungen Parameterstudie Wärmebrücken und Ökobilanz

Tabelle A1: Wärmeschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe nach **DIN 4108-4**, ergänzt durch **DIN EN ISO 10456** (alphabetisch sortiert)

Farbe THERM	Schraffur Vectorworks	Baustoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Emissionsgrad e [-]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Richtwert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ (feucht/trocken) [-]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p [J/(kg·K)]
		Beton, bewehrt 2% nach DIN EN 206	2,500	0,94	2500	80/130	1000
n.v.		Beton, unbewehrt nach DIN EN 206	2,000	0,94	2300	80/130	1000
n.v.		Bitumenbahnen nach DIN EN 13707	0,170	0,90	(1200)	20000	1000
n.v.		BFU-Platte nach DIN EN 13986, DIN EN 636	0,130	0,90	500	70/200	1600
		Dämmung EPS nach DIN EN 13163	$\leq 0,040$	0,90	10-50	20/100	1450
		Dämmung Holzfaser nach DIN EN 13171	$\leq 0,040$	0,90	~ 100	5/5	2000
		Holzfaserdämmplatte nach DIN EN 13171, DIN EN 622-4	$\leq 0,055$	0,90	40-250	3/5	2000
		Dämmung Mineralwolle nach DIN EN 13162	$\leq 0,040$	0,90	10-200	1/1	1030
		Dämmung PUR nach DIN EN 13165	$\leq 0,040$	0,90	28-55	40/200	1400
		Dämmung XPS nach DIN EN 13164	$\leq 0,040$	0,90	20-65	80/250	1450
		Dämmung Zellulose, lose	$\leq 0,040$	0,90	20-60	2/2	1600
		Erdreich (Sand, Kies)	2,000	0,90	1700- 2200	50/50	910–1180
		Estrich (Asphaltestrich)	0,700	0,94	2100	50000	1000
		Estrich (Zementestrich)	1,400	0,94	2000	15/35	2000
		Fliesen	1,300	0,90	2300	∞	840
		GF-Platte nach DIN EN 15283	0,350	0,95	1200	4/10	1000

Farbe THERM	Schraffur Vectorworks	Baustoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m*K)]	Emissionsgrad e [-]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Richtwert der Wasserdampf- Diffusionswiderstandszahl μ (feucht/trocken) [-]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p [J/(kg · K)]
		GKF-Platte nach DIN 18180, DIN EN 520	0,250	0,95	900	4/10	1000
		Hohlraum, unbelüftet	nach Dicke	0,90	-	1	1008
		Holzfaserverbundplatte (Spanplatte), zementgebunden	0,230	0,90	1200	30/50	1500
		HWS-Platte (OSB) nach DIN EN 13986, DIN EN 300, DIN EN 12369-1	0,130	0,90	650	30/50	1700
		HWS-Platte (MDF) nach DIN EN 13986, DIN EN 622-5, DIN EN 12369-1	0,100	0,90	600	5/10	1700
		HWS-Platte (Spanplatte) nach DIN EN 13986, DIN EN 312, DIN EN 12369-1	0,140	0,90	600	15/50	1700
n.v.		Kies (Flachdach)	-	-	1700- 2200	-	-
		KVH nach DIN EN 338 BSH nach DIN 14080	0,130	0,90	500	20/50	1600
		LSL nach Z-9.1-323	0,130	0,90	700	Keine Angaben	Keine Angaben
n.v.		Luftdichtung / Dampfbremse	-	-	-	∞	-
		Parkett	0,130	0,90	500	20/50	1600
		Putz (Kalk- und Kalkze- mentputz)	1,000	0,94	1800	15/35	1000
		Putz (Kalk-Gipsputz)	0,700	0,95	1400	10	1000
		Putzträgerplatte nach DIN EN 12467, Z-31.4-183	0,300	0,90	1300	84/143	Keine An- gaben
		TSD WLS 040 nach DIN EN 13163	0,040	0,90	10-50	20/100	1450
n.v.		Wasserperrschicht/ Feuchteschutzbahn	-	-	-	-	-

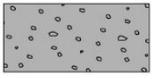
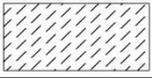
Farbe THERM	Schraffur Vectorworks	Baustoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Emissionsgrad e [-]	Rohdichte ρ [kg/m ³]	Richtwert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ (feucht/trocken) [-]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p [J/(kg · K)]
		Zementgeb., glasfaserbewehrte Sandwicheplatte nach Z-31.1-176	0,400	0,90	1000	40/40	1000
		Zementmörtel nach DIN EN 413	1,600	0,94	2000	15/35	2000

Tabelle A2: Randbedingungen THERM 7.3

Name	Kehrwert Wärmeübergangswiderstand $1/R$ [W/(m ² K)]	Temperatur [°C]
Adiabatisch	0	0
Feuchteschutz – Ermittlung der Oberflächentemperaturen		
Außenbereich	25	-5
Beheizter Raum	4	20
Beheizter Raum, Verglasung	7,692	20
Erdreich	0	10
Feuchteschutz, unbeheizter Raum	5,882	10
Wärmeschutz – Ermittlung des Wärmebrückenkoeffizienten		
Abwärts gerichteter Wärmestrom, beheizt	5,882	20
Abwärts gerichteter Wärmestrom, unbeheizt	5,882	5
Aufwärts gerichteter Wärmestrom, beheizt	10	20
Horiz. gerichteter Wärmestrom, beheizt	7,692	20
Horiz. gerichteter Wärmestrom, unbeheizt	7,692	5
Horiz. gerichteter Wärmestrom, Außenbereich	25	-5
Horiz. gerichteter Wärmestrom, Außenbereich, hinterlüftet	7,692	-5
Hinterlüftete Dachflächen	10	-5

Tabelle A3: Materialdaten Ökobilanz

Baustoff	Ökodaten Ökobaudat 2011	End of Life
Aluminiumblech	4.3.01 Aluminiumblech 4.7.01 Eloxieren von Aluminium	4.8.01 Recyclingpotential - Aluminium (Blech und Profile)
Beton, bewehrt nach DIN EN 206	1.4.01 Transportbeton C20/25 4.1.02 Bewehrungsstahl (Stahlanteil gem. Statik)	Transportbeton: 9.5.01 Bau- schutttaufbereitung Bewehrungsstahl: Kein EoL Szenario (Herstellung aus Re- cyclingstahl)
Beton, unbewehrt nach DIN EN 206	1.4.01 Transportbeton C20/25	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
Bitumenbahnen nach DIN EN 13707	6.3.01 Bitumenbahn V 60	9.5.04 Verbrennung Hausmüll
BFU-Platte nach DIN EN 13986, DIN EN 636	3.2.02 Sperrholzplatte	3.4.03 End of life - Holzwerkstoffe in MVA
Dämmung EPS nach DIN EN 13163	2.2.01 EPS W/D 035 - IVH	2.22.06 End of life - EPS Wand und Boden - IVH
Dämmung Holzfaser nach DIN EN 13171	2.10.01 Holzfaserdämmplatte Mix (Trockenverfahren)	2.22.01 End of life - Holzfaser- dämmplatte
Dämmung Holzfaser nach DIN EN 13171, DIN EN 622-4	2.10.01 Holzfaserdämmplatte Mix (Trockenverfahren)	2.22.01 End of life - Holzfaser- dämmplatte
Dämmung Mineral- wolle nach DIN EN 13162	2.1.01 Mineralwolle (Fassaden- bzw. Innenausbau- bzw. Schrägdach-Dämmung)	9.5.02 Bauschuttdeponierung
Dämmung PU nach DIN EN 13165	2.4.03 PU-Dämmplatte (PU Blockschaum, 15 cm) - IVPU	6.8.01 Verbrennung PS in MVA inkl. Gutschrift
Dämmung XPS nach DIN EN 13164	2.3.1 XPS-Dämmstoff	6.8.01 Verbrennung PS in MVA incl. Gutschrift
Dämmung Zellulose, lose	2.11.01 Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	2.22.01 End of life - Holzfaser- dämmplatte
Erdreich (Sand, Kies)	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Estrich (Asphal- tetrich)	1.5.02 Gussasphalt	9.5.04 Verbrennung Hausmüll
Estrich (Zemen- tetrich)	1.4.03 Zementestrich - IWM	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
Faserzementplatten	1.3.12 Faserzement Fassaden- tafeln beschichtet Textu- ra/Natura - Eternit	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
Fliesen	1.3.07 Steinzeugfliesen glasiert	9.5.01 Bauschutttaufbereitung
GF-Platte nach DIN EN 15283	1.3.13 Gipsfaserplatte	9.5.01 Bauschutttaufbereitung

Baustoff	Ökodaten Ökobaudat 2011	End of Life
GKF-Platte nach DIN 18180, DIN EN 520	1.3.13 Gipskartonplatte (Feuerschutz bzw. imprägniert)	9.5.01 Bauschuttzubereitung
Holzfaserverplatte (Spanplatte), ze- mentgebunden	3.2.08 Holzzementplatte Duri- panel - Eternit	9.5.04 Verbrennung Hausmüll
Holzverschalung	3.1.01 Schnittholz Lärche (12% Feuchte/10,7% H ₂ O)	3.4.03 End of life - Holz natur- belassen in MVA
HWS-Platte (OSB) nach DIN EN 13986, DIN EN 300, DIN EN 12369-1	3.2.04 OSB (Durchschnitt)	3.4.02 End of life – OSB (Durchschnitt)
HWS-Platte (MDF) nach DIN EN 13986, DIN EN 622-5, DIN EN 12369-1	3.2.07 MDF - Egger	3.4.04 End of life - MDF – Egger
HWS-Platte (Span- platte) nach DIN EN 13986, DIN EN 312, DIN EN 12369-1	3.2.06 Spanplatte (Durchschnitt)	3.4.01 End of life – Spanplatte (Durchschnitt)
Kies (Flachdach)	1.2.01 Kies 2/32	9.5.01 Bauschuttzubereitung
KVH nach DIN EN 338 BSH nach DIN 14080	3.1.02 Konstruktionsvollholz 3.1.04 Brettschichtholz Nadel- holz	3.4.03 End of life – Holz natur- belassen in MVA
LSL nach Z-9.1-323	3.2.06 Spanplatte (Durch- schnitt)	3.4.01 End of life – Spanplatte (Durchschnitt)
Luftdichtung/ Dampfbremse	6.6.02 Dampfbremse PE	6.8.01 Verbrennung Kunststoff in MVA incl. Gutschrift
Parkett	3.3.02 Mehrschichtparkett	3.4.03 End of life – Holz natur- belassen in MVA
Putz (Kalk- und Kalkze- mentputz)	2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Dekorputz mineralisch 2.21.01 WDVS Verklebung und Beschichtung Kratzputz mineralisch	9.5.02 Bauschutt-Deponierung

Anhang 2: Konstruktionskatalog