

A Holzfassadenelemente für Hybridbauweisen

M. Kleinhenz, P. Schneider, C. Dotzler, R. Stein



Dipl.-Ing. Miriam Kleinhenz
2007-2012 Diplom-Studiengang Bauingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
2013-2014 bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, Tragwerksplanung
seit 2014 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München



Dipl.-Ing. Patricia Schneider, Architektin
1993-2000 Diplom-Studiengang Architektur an der TU München, EPF Lausanne und Universität Stuttgart
2001-2009 Mitarbeit bei House and Robertson Architects, coop Himmelb(1)au und Gehry Partners, Los Angeles
2009 Gründung eigenes Architekturbüro in München (seit 2013 ±e Bürogemeinschaft für energieeffizientes Bauen)
seit 2010 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, TU München



Dipl.-Ing. (FH) Christina Dotzler, M. Eng.
2006-2010 Diplom-Studiengang Bauingenieurwesen an der HS Regensburg
2010-2012 Master-Studiengang Bauingenieurwesen an der HS Regensburg
2012-2013 BBI – Bauer Beratende Ingenieure GmbH, Tragwerksplanung
seit 2014 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, TU München



Dr.-Ing. René Stein (Projektleitung)
1995-2000 Studium Bauingenieurwesen (Konstruktiver Ingenieurbau), Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig (FH)
2001 Projektingenieur bei der Holzbau Zinner GmbH, Auerbach-Michelfeld
2001-2003 Diplom-Studiengang Bauingenieurwesen (Holzbau und Brandschutz), Universität Leipzig
2003-2004 Prüflingenieur in den Bereichen Baulicher Brandschutz, Konstruktiver Ingenieurbau und Bauphysik, MFPA Leipzig GmbH
seit 2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TU München
seit 2010 Leiter Zertifizierungsstelle für „Hochfeuerhemmende Holzbauteile“ am MPA BAU der TU München
2016 Dissertation „Zur Bewertung beeinflussender Faktoren auf Brandweiterleitungsmechanismen in Bauteilfugen vorgefertigter Holzbauelemente“

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Innerhalb eines Hybridbaus werden verschiedene Baustoffe miteinander kombiniert, um die Vorteile eines jeden Baustoffs zu nutzen und möglichst effiziente Lösungen zu realisieren. Im Bereich des Massivbaus haben sich Stahlbetontragwerke als Rohbaulösungen im mehrgeschossigen Bau vielfach bewährt. Gleichzeitig zeigte sich im Bereich des Holzbaus, dass vorgefertigte Holzfassadenelemente qualitativ hochwertige und hochgedämmte Lösungen zur Ausführung als Gebäudehülle darstellen. Der hohe Vorfertigungs- / Industrialisierungsgrad der Holzbaubetriebe ermöglicht eine starke Verringerung der Gesamterrichtungszeit, erfordert jedoch gleichzeitig das entsprechende Knowhow sowie eine effektive Vorplanung.

Eine funktionale Trennung der Gebäudehülle in Holzbauweise von dem Tragwerk in Stahlbetonbauweise ist der entscheidende Faktor, um Holzbaulemente innerhalb des mehrgeschossigen Bauens bis zur Hochhausgrenze zu ermöglichen. Dabei entspricht die nichttragende nur nach außen abgrenzende Funktion der vorgefertigten Holzfassadenelemente ohne Abweichung dem Anwendungsbereich der derzeit gültigen Bauordnung.

Stahlbetontragssysteme mit tragenden Holzfassadenelementen sind bereits in einigen Projekten zu finden. Im Falle von Hybridbauten mit nichttragenden Holzfassadenelementen sind dagegen bisher wenige Referenzprojekte realisiert worden. Trotz Beschleunigung des Bauprozesses aufgrund der hohen Vorfertigung der nichttragenden Fassadenelemente scheinen momentan die Abstimmung der beiden Gewerke sowie die damit verbundene frühzeitige Detaillierung und Koordinierung Hindernisse darzustellen. Wissenslücken an der Schnittstelle zwischen Stahlbetonbauteilen und Holzbaulementen führen zu einem erschwerten Umgang mit der Hybridbauart. Gleichzeitig rückt innerhalb der Planung die Betrachtung von Nachhaltigkeitsindikatoren wie Primärenergiebedarf oder Treibhausgasemissionen zunehmend in den Fokus, für deren Optimierung ein verstärkter Einsatz des nachwachsenden Baustoffes Holz großes Potenzial aufweist.

1.2 Herausforderungen und Ziele des Projekts

Innerhalb des Forschungsvorhabens “Fassadenelemente für Hybridbauweisen” schlossen sich drei Lehrstühle der Technischen Universität München (TUM) zu einem Verbundprojekt zusammen: Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter, federführend), Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (Univ. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang) sowie Lehrstuhl für Massivbau (Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer).

Ziel des Verbundprojektes war die Förderung des Hybridbaus in der Variante Stahlbetontragwerk mit nichttragenden Holzfassadenelementen. Für die Fassadensysteme und deren Schnittstelle mit der Tragstruktur wurden Details entwickelt, die den Einsatz von Holzelementen bei Gebäuden bis zur Hochhausgrenze möglich machen sowie die Wissenslücken zwischen den beiden Gewerken schließen sollen. Auf der Grundlage des Standes der Technik wird die Schnittstelle innerhalb der Bereiche Schallschutz, Brandschutz, Wärmeschutz und Maßtoleranzen diskutiert und entwickelt.

Ziel eines im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt entwickelten Konstruktionskatalogs ist der baurechtlich gesicherte Einsatz vorgefertigter und qualitativ hochwertiger Holzbaufassadenelemente in Verbindung mit Stahlbetontragwerken. Die wachsende Bedeutung von Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz von Gebäuden wird durch Aufzeigen von Lebenszyklusanalysen und Recyclingkonzepten mit aufgenommen und dient als Grundlage für Vergabeentscheidungen.

2 Tragwerk

Die Tragstruktur wird als Stahlbetontragwerk konzipiert. Weitestgehend üblich ist die Verwendung oder auch die Mischung zweier Stahlbetonbauweisen: Stahlbetonskelett- und Stahlbetonschottenbauweise.

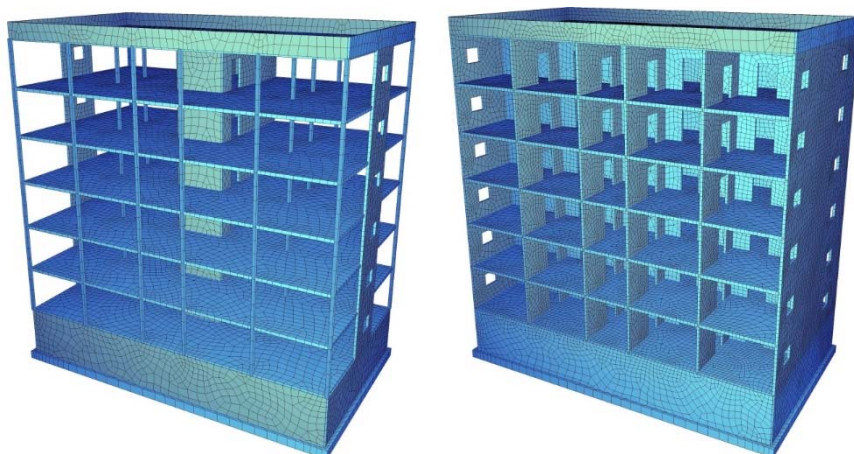


Abb. 2.1: Dreidimensionale Rechenmodelle eines Skelett- bzw. Schottenbaus (Eigene Darstellung)

Während der Vorteil der Skelettbauweise darin besteht eine flexiblere Grundstruktur aufzuweisen, welche lediglich durch das Stützenraaster sowie die notwendigen Aussteifungskerne eingegrenzt wird, setzt die Schottenbauweise eine bereits in der Entwurfsplanung festgelegte Einteilung der Stockwerke in einzelne Bereiche voraus. Andererseits führt die einfache statische Struktur der tragenden und meist auch aussteifenden Querwände der Schottenbauweise zu einer Vereinfachung des rechnerischen Aufwands innerhalb der Nachweisführung.

2.1 Gebäudehülle

2.1.1 Holzfassadenelemente

Im Bereich des Holzbaus ist die Verwendung vorgefertigter Bausysteme weit vorangeschritten. Im Bereich von Bausystemen für Außenwände lassen sich vorgefertigte Holzbauelemente vereinfachend in die Systembereiche Fassade, Kernelement und Installationsebene einteilen.

Dem Kernelement werden viele Funktionen auf engem Raum zugeordnet. Die Hauptfunktion des Kernelements liegt in der Einhaltung bauphysikalischer Anforderungen. Im Falle einer Holzrahmenbauweise ist innerhalb der Tragebene gleichzeitig die Dämmebene angeordnet. Stabilisierende, beidseitige Bekleidungen aus Holz- und/oder Gipswerkstoffen schließen das Kernelement flächig zu einem beidseitig geschlossenen und hohlraumfrei gedämmten Element ab. Die Bekleidungen übernehmen zusätzlich die Funktionen der Luft- und Winddichtheit.

Das Kernelement kann mit einem flexibel gestaltbaren Fassadensystem versehen werden. Unterschieden werden hierbei Fassadensysteme mit und ohne Hinterlüftung. Eine spezielle Form der hinterlüfteten Fassade stellt eine unterlüftete Fassade dar, die nur von unten be- sowie entlüftet wird. Nicht hinterlüftet ist dagegen eine Kompaktfassade in Form eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) als Außendämmung mit äußerem Putzsystem ([1], 5.2.1.2). Ein WDVS zählt zu den nicht geregelten Bauprodukten gemäß Bauregelliste B Teil 1. Daher wird für ein WDVS eine technische Spezifikation in Form einer Europäischen technischen Bewertung (ETB) (engl. ETA - European

Technical Assessment) erforderlich. Dabei ist zwingend auf die Verwendung geeigneter Einzelkomponenten des WDVS gemäß ETB zu achten.

Durchdringungen im Bereich des Kernelements sind zu vermeiden. Nach erfolgter Montage ist es von Vorteil, wenn Installationsführungen unabhängig von der vorgefertigten Gebäudehülle, bestehend aus dem Kernelement und ggfs. schon applizierter Fassade, integriert werden können. Dies kann durch eine raumseitig angeordnete Vorsatzschale erreicht werden, in der Installationen auf der Baustelle verlegt werden können ([2], S.68).

In den folgenden Skizzen werden beispielhaft horizontale Schnitte von Wandaufbauten mit Vorsatzschale bzw. Kompaktfassade sowie unterschiedlichen Installationsebenen dargestellt.

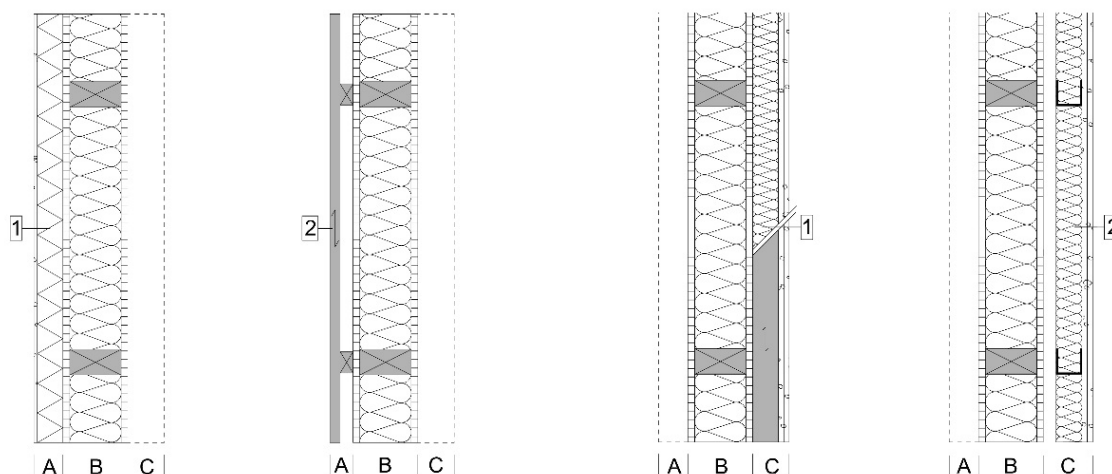


Abb. 2.2: Wandaufbauten im Horizontalschnitt (Eigene Darstellung)
 (links) 1) Kompaktfassade + Kernelement, 2) Hinterlüftete Fassade + Kernelement
 (rechts) 1) Kernelement + direkt verbundene Installationsebene, 2) Kernelement + mit Abstand vorgesetzte Installationsebene

2.1.2 Anschlussvarianten

Die Fassadenelemente geben die tragende Funktion an das innere Gebäudetragwerk ab, d.h. es wird keine tragende oder aussteifende Funktion für das Gesamttragwerk übernommen. Die somit nichttragenden Fassadenelemente werden je nach Anschlussvariante an das Stahlbetontragwerk angeschlossen bzw. darin eingestellt. Die Positionierung wirkt sich unterschiedlich auf die bauphysikalischen Eigenschaften im Anschlussbereich sowie die Belastung der Befestigungsmittel aus. Prinzipiell können vereinfacht drei Anschlussvarianten unterschieden werden: „vorgestellt“, „vorgehängt“ und „eingestellt“.

Die vorgestellte Variante stellt die nichttragende Außenfassade als ein vorgestelltes Bauteil dar, dessen Eigenlast über die einzelnen Fassadenelemente nach unten hinweg in die Konstruktion oder ein eigenes Fundament weitergeleitet oder geschossweise über eine Verbindung in die untere massive Decke eingeleitet wird. Bei der vorgehängten Variante befinden sich die Fassadenelemente ebenfalls außerhalb des Tragwerks, werden jedoch geschossweise an die oberen massiven Decken angehängt. Bei der eingestellten Variante werden die Außenfassadenelemente geschossweise direkt auf den massiven Decken des Tragwerks aufgestellt und liegen somit in einer Ebene innerhalb des Tragwerks.

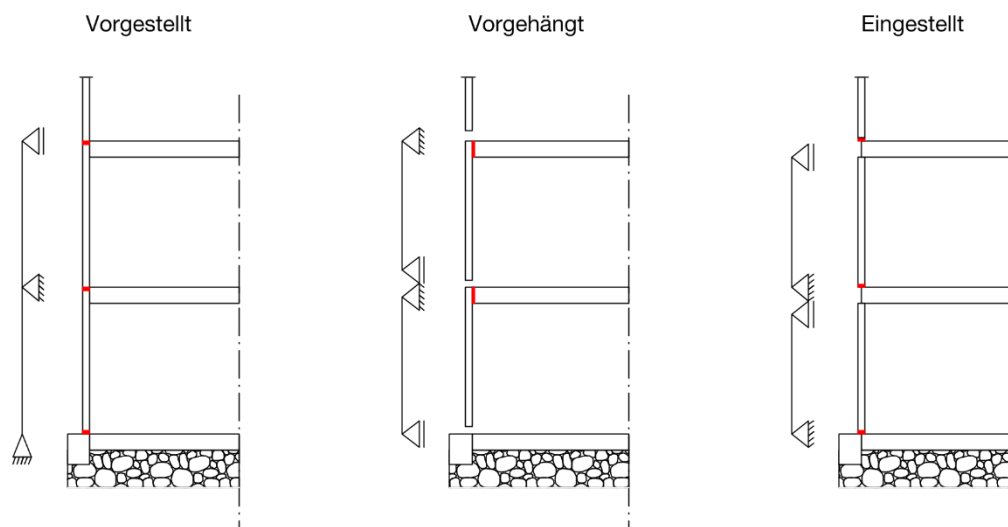


Abb. 2.3: Anschlussvarianten nichttragender Fassadenelemente (Eigene Darstellung)

In Abhängigkeit von bauphysikalischen Kenngrößen des Wärmeschutzes (siehe Abschnitt 3.3) oder des Schallschutzes (siehe Abschnitt 3.1) wurden die Anschlussvarianten diskutiert, wobei auf Anraten der projektbegleitenden Arbeitsgruppe die vorgehängte Variante vernachlässigt wurde. Im Falle der eingestellten Variante werden die Elemente mit unterschiedlichen Einstellgraden auf den Deckenrändern der Tragstruktur gelagert, wobei die Standsicherheit der Fassadenelemente zu gewährleisten ist.

Herausforderungen an der Schnittstelle zwischen Holzfassadenelement und Stahlbetontragwerk stellen die einzuhaltenden Maßtoleranzen dar, welche benötigt werden, um ein funktionsgerechtes Zusammenfügen der Bauelemente zu gewährleisten. Hierbei werden im Endbericht auf Grenzabweichungen der vorgefertigten Holzfassadenelemente gemäß DIN 18203-3 [3] sowie baustoffunabhängige Winkelabweichungen gemäß DIN 18202 [4] verwiesen. Toleranzen zwischen Holzbau und Massivbau von bis zu 30 mm wurden berücksichtigt.

Lastabhängige Verformungen der Stahlbetondecken wurden unter Berücksichtigung der Langzeiteffekte Kriechen und Schwinden mit einbezogen. Der Lehrstuhl für Massivbau (TUM) übernahm die Durchführung von Simulationsrechnungen und von Bauteilversuchen zur differenzierteren Analyse des Verformungsverhaltens im Zustand II. Zur Herstellung optimierter Anschlüsse zwischen Holzbauelementen und Stahlbetontragwerk flossen die Ergebnisse in den iterativen Prozess mit ein.

2.1.3 Bemessung der Holzrahmenbauelemente

Auch wenn die nichttragenden Außenwandelemente nicht zur Sicherung der Standsicherheit des Gebäudes herangezogen werden, müssen sie dennoch ihr Eigengewicht sowie eine Beanspruchung aus horizontaler Windlast aufnehmen und geschossweise an das Tragwerk weiterleiten können. Das Kernelement des Fassadenelementes beinhaltet hierfür die Tragstruktur - im Falle des Holzrahmenbaus - ein stabförmiges Traggerippe bestehend aus vertikalen Ständern sowie horizontaler Schwelle und Rähm.

Maßgebende Tragfähigkeitsnachweise gemäß Eurocode EN 1995-1-1 ([5], [6]) für die geschossweise befestigten Elemente sind hierbei Nachweise aus Windbeanspruchung senkrecht zur Wand. Im Falle einer vorgestellten Anschlussvariante 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.

Zusammengefasst wurden erforderliche Mindestquerschnittsmaße zur Orientierung im Endbericht festgehalten. So sind im Falle einer eingestellten Anschlussvariante Ständerquerschnitte von $60 \times 120 \text{ mm}^2$ bis Windzone 4 und einer Gebäudeklasse GKL 5 in Kombination mit einer Geschosshöhe von 3 m möglich. Projektbezogene Nachweise in Abhängigkeit der gegebenen Randbedingungen sind jedoch weiterhin unumgänglich.

3 Methodik und Ergebnisse

3.1 Schallschutzversuche

3.1.1 Grundlagen

Der Schallschutz ist ein wesentliches Kriterium, um ein gesundes Wohn- und Arbeitsumfeld gewährleisten zu können. Eine zunehmende Verdichtung und eine hohe Außenlärmbelastung in Innenstädten verleihen diesem Thema immer größere Wichtigkeit. Der Mindestschallschutz in Form von Zielwerten und Nachweisverfahren ist unabhängig von der Bauweise in der nationalen Norm DIN 4109 [7] für den Schallschutz gegen Außenlärm und im Gebäudeinnern je nach Wohn- oder Arbeitsbereich und je nach Bauteil festgelegt. Momentan wird die geltende Norm aus dem Jahr 1989 durch eine Nachfolgenorm aus dem Jahr 2016 ersetzt, welche bereits als Grundlage für dieses Projekt diente.

Als Kenngrößen zur Quantifizierung des Schallschutzes werden das bewertete Bau-Schalldämmmaß R'_w für den Luftschallschutz sowie der bewertete Norm-Trittschallpegel $L'_{n,w}$ für den Trittschallschutz herangezogen. Erhöhte Richtwerte für einen erhöhten Schallschutz für den Wohnungsbau können der Richtlinie VDI 4100 [8] entnommen werden. Das Nachweisverfahren kann mittels Berechnung, Tabellenverfahren, Beispielwerten aus Referenzprojekten oder eigener Messungen erfolgen. Die Kenngrößen stellen den direkten Weg der Schallübertragung dar, d.h. Anteile aus Flankenübertragungen über die flankierenden Bauteile hinweg werden mitberücksichtigt.

3.1.2 Versuchsserie

Eine Wissenslücke des untersuchten Hybridbaus ergab sich aufgrund fehlender Werte der Flankenübertragung von Körperschall und Trittschall an Wand und Deckenanschlüssen. Aufgrund dessen wurde in Zusammenarbeit mit dem Schallprüfzentrum ift Rosenheim eine umfangreiche Versuchsserie durchgeführt. Mit Unterstützung des Holzbauunternehmens Huber & Sohn GmbH & Co. KG wurden Holzrahmenbauelemente (Grundwand: MDF-Platte 15 mm, KVH / Wärmedämmung WLG 035 140 mm, OSB-Platte 15 mm) hergestellt sowie montiert. In unterschiedlichen Prüfvarianten wurde die Flankenschalldämmung in vertikaler und horizontaler Richtung als vorgestellte sowie eingestellte Fassade mit und ohne Vorsatzschale sowie mit und ohne WDVS gemessen.

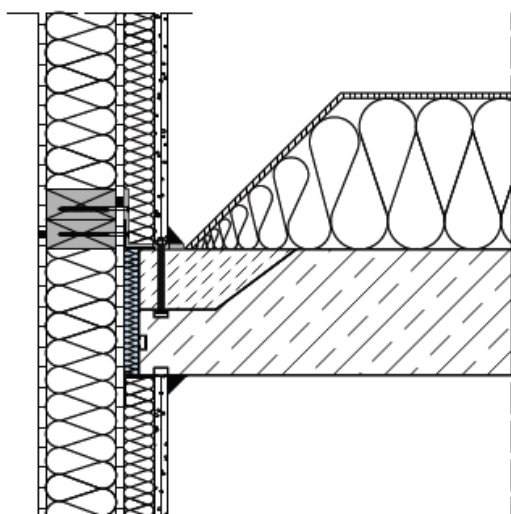


Abb. 3.1: Prüfvariante: Vorgestellte Fassade mit Vorsatzschale im Vertikalschnitt (Eigene Darstellung)

3.1.3 Ergebnisse Flankenschallübertragung

Ergebnisse der Flankenschallübertragungsmessung ergaben, dass die Hybridbauweise die Anforderungen der DIN 4109 sowie den Schallschutzstufen SSt I und SSt II nach VDI 4100 erfüllt. Im Falle der vorgestellten Fassade ist der Einsatz einer Vorsatzschale erforderlich. Eine luftdichte Ausführung wird vorausgesetzt. Die Zielwerte der Schallschutzstufe SSt III nach VDI 4100 können nur in Einzelfällen erreicht werden. Hierbei ist eine entsprechend hochschalldämmende Ausführung der Trennbauteile mit $R_w \geq 71$ dB erforderlich. Das bewertete Bau-Schalldämmmaß eines Trennbauteils inklusive Nebenwege R'_{w} wird gemäß DIN 4109:2016 aus dem bewertetem Schalldämm-Maß R_w und dem bewerteten Flankendämm-Maß $R_{ij,w}$ bei Berücksichtigung aller Nebenwege berechnet.

3.2 Brandschutz

3.2.1 Grundlagen

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), d.h. bis zu acht Geschossen, ermöglicht. Der Anwendungsbereich ergibt sich in Deutschland aus der Muster-Bauordnung (MBO) [9] bzw. den jeweiligen Landesbauordnungen. Trotz nichttragender Funktion müssen die Elemente, bezogen auf den Brandfall, Eigen- und Windlasten geschossweise in das Tragwerk übertragen, sodass die Außenwände über dem Brandgeschoss an ihrem Ort verbleiben.

3.2.2 Bewertung der Anschlüsse

Die Anforderungen an Anschlusssituationen ergeben sich aus den §§ 29, 31 MBO, nach denen Trennwände als raumabschließende Bauteile von Räumen oder Nutzungseinheiten und Decken als tragende und raumabschließende Bauteile zwischen Geschossen im Brandfall eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen die Brandausbreitung und Standsicherheit aufweisen müssen.

Nach § 28 MBO muss der Anschluss der nichttragenden Außenwandelemente 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 in den Bereich der Außenwand übertragen (siehe Abb. 3.2).

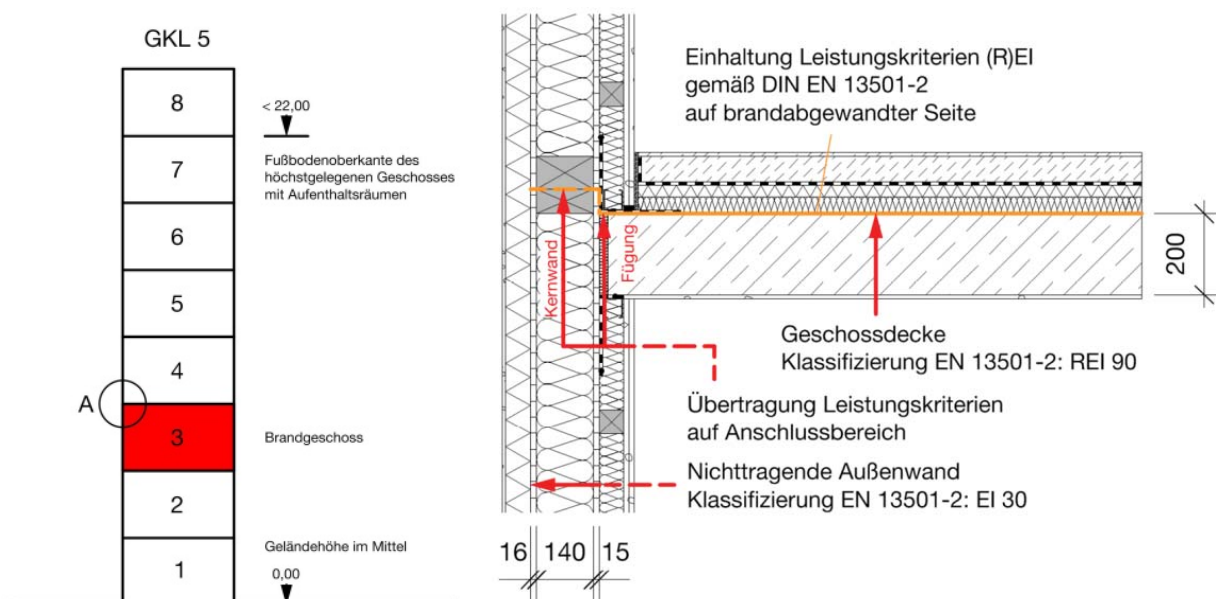


Abb. 3.2: Brandschutztechnische Anforderungen im Anschlussbereich

Die maßgebliche Beanspruchung tritt auf, wenn für die Decke ein Feuerwiderstand von 90 Minuten (GKL 5) gefordert wird. Dem gegenüber steht der notwendige Feuerwiderstand der nichttragenden Außenwände von 30 Minuten. Zur Bewertung der Anschlussdetails wurden Ergebnisse aus den Untersuchungen zu Brandweiterleitungsmechanismen in Bauteilfugen [10] herangezogen. Darin ist ein Brandbarrieremodell für Anschlussausbildungen in Abhängigkeit von bauteil- und objektbezogenen Fugen enthalten. In einem ersten Schritt wird die Feuerwiderstandsfähigkeit der Holz- und Betonbauteile bestimmt, u.a. mit Berechnungs- und Tabellenverfahren der Eurocodes EN 1995-1-2 [11], EN 1992-1-2 [12] oder ETB. Bei den Holzbauteilen wird vereinfacht nur das Kernelement (beidseitig bekleidete Holzrahmenbauwand) ohne Fassadensystem und Installationsebene berücksichtigt.

3.2.3 Ergebnisse

Zur Bewertung der Anschlussdetails wird Bild A.2 DIN 1992-1-2 herangezogen, welches Temperaturprofile innerhalb einer einseitig beanspruchten Betondecke mit einer Dicke von 200 mm darstellt. Nach 90 Minuten Brandbeanspruchung von der Unterseite liegt die 300°-Isotherme in Tiefe $x = 54$ mm. Der Isothermenverlauf zeigt, dass die auf der Betonrohdecke angeordneten Stahlwinkel noch im kalten Bereich liegen, und damit eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit in Bezug auf die Standsicherheit der über dem Brandgeschoss befindlichen Fassadenelemente erreicht wird.

Die maßgebliche Dicke der Fassadenelemente ergibt sich aus wärmeschutztechnischen Anforderungen. In Abhängigkeit der Art und Anordnung der Dämmstoffe (siehe Abb. 2.2) werden Feuerwiderstandsdauern von 30 bis 90 Minuten erreicht. Zum Beispiel erhält man nach der Berechnungsmethode nach DIN EN 1995-1-2 unter Zugrundelegung des nachfolgend beschriebenen Aufbaus des Kernelementes in Holzrahmenbauweise (15 mm OSB [13], 140 mm Steinwolle [14], $\rho = 26$ kg/m³, 15 mm MDF [13]) einen Feuerwiderstand ≥ 60 Minuten (Kriterien EI). Die 300°-Isotherme liegt bei Erreichen der Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten noch innerhalb des

Kernelementes. Ein Feuerwiderstand $EI \geq 60$ Minuten wird auch mit biogenen Dämmstoffen im Kernelement, z.B. mit Holzfaserdämmstoffen erreicht. Der Nachweis erfolgt über Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweise der entsprechenden Hersteller.

Zur Sicherstellung der Rauchdichtigkeit wird die objektbezogene Fuge u.a. mit Mineralfaserdämmung aus Steinwolle (Schmelzpunkt $\geq 1000^\circ\text{C}$ gemäß DIN 4102-17 [15]) ausgebildet und beidseitig mit einer luft- bzw. rauchdichten Abklebung versehen. Bei unter- oder oberseitiger Brandbeanspruchung befindet sich immer eine Abdichtungsebene im kalten Bereich. Der Funktionserhalt der Luft- und Rauchdichtigkeit ist dadurch gewährleistet.

Für den Fall, dass die Fassadenelemente vor dem Erreichen der Feuerwiderstandsdauer der Trenndecke (siehe Abb. 3.2) im Brandgeschoss versagen, muss nicht nur sichergestellt sein, dass die Kernelemente oberhalb des Brandgeschosses vor Ort verbleiben, sondern auch das brandbeanspruchte Element im Stirnbereich der Decke. Die Lagesicherung wird durch die Verbindung der inneren und äußeren Bekleidung des Kernelementes jeweils mit dem Rähm des unteren und der Schwelle der oberen Elemente hergestellt. Brandversuche aus dem Projekt „smartTES“ [16] bestätigen, dass derartige Anschlusssituationen eine Feuerwiderstandsfähigkeit von 90 Minuten erreichen, d.h. die Leistungskriterien EI für die raumabschließende Wirkung werden im Anschlussbereich erfüllt.

Der Einsatz von Holzfaserdämmstoffen im Fassadenbereich wird durch § 28 MBO in den Gebäudeklassen GKL 4 und 5 durch die Forderung der Schwerentflammbarkeit erschwert, ist aber im Rahmen von individuellen Brandschutzkonzepten unter Formulierung von Kompensationsmaßnahmen möglich. Durch die Vergrößerung des Einsatzgebietes von biogenen Dämmstoffen in den Fassadenelementen kann eine Verbesserung der Ökobilanz (siehe Abschnitt 3.4) erreicht werden.

3.3 Wärmebrückenberechnungen und -optimierung

3.3.1 Grundlagen

Für die Bewertung des Wärme- und Feuchteschutzes (nach DIN 4108, insbesondere DIN 4108-2 [17], bzw. EnEV 2014 [18]) werden primär die Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche des Gebäudes ermittelt. Ferner wird der Dämmstandard der konstruktiven und materiellen Wärmebrücken, die durch wechselnde Bauteilschichten und/oder Bauteilanschlüsse entstehen, beeinflusst. Nach DIN 4108 Beiblatt 2 [19] werden Planungs- und Ausführungsbeispiele für standardisierte Bauteilanschlüsse des Holz- und Massivbaus gegeben. Hybride Bauweisen sind dabei unterrepräsentiert, weshalb es eines der Projektziele war, einen Wärmebrückenkatalog für Standardausführungen in Hybridbauweise zu entwickeln.

3.3.2 Entwicklung Parameterstudie

Vor diesem Hintergrund wurden zunächst die Anforderungen an den Wärme- und Feuchteschutz nach DIN 4108 geprüft und nachgewiesen. Die projektspezifischen Bauteilaufbauten sollen dabei den Dämmstandard für Niedrigstenergiegebäude erfüllen (z.B. $U_{AW} \leq 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$). Zur allgemeinen Bewertung der Wärmebrücken und deren Optimierungspotential wurden anhand von Referenzprojekten insgesamt elf Variantenuntersuchungen für Dach-Decken-, Wand-Decken- und Wand-Bodenplattenanschlüsse durchgeführt. Eine Sammlung an Referenzprojekten diente dem Projekt zum Aufzeigen des aktuellen Stands und der Variantenuntersuchung als Basisdetails. Für die Berechnung der zweidimensionalen Wärmebrücken wurde die Open Source Software THERM 7.3 des Lawrence Berkeley National Laboratory herangezogen. Der außenmaßbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e wurde für die Parameterstudie nach DIN EN ISO 10211 [20], DIN EN ISO 13370 [21], DIN EN ISO 13789 [22] und nachfolgender Formel berechnet.

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

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

3.3.3 Beispiel Parameterstudie Wärmebrücken

Nachfolgendes Beispiel zeigt den Geschossdeckenanschluss des Referenzprojektes „Bildungszentrum Tor zur Welt, Hamburg“. Innerhalb dieser Variante sollte der Dämmeinfluss der Installationsebene bei vorgestellten Außenwänden und hinterlüfteten Fassaden untersucht werden. Die Außenwand wurde bereits in sehr hohem Dämmstandard ausgeführt ($U_m = 0,123 \text{ W/m}^2\text{K}$; Dämmstärke Kernelement: 260 mm; Dämmstärke Installationsebene: 75 mm). Um eine Aussage über den Einfluss der Installationsebene auf den außenmaßbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten ψ_e treffen zu können, wurden die Dämmstärken zwischen 40 und 80 mm variiert (vgl. Abb. 3.3).

3.3.4 Ergebnis Parameterstudie

Aus Abbildung 3.4 geht deutlich hervor, dass sich mit Verbesserung des U-Wertes ein schlechterer längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient ψ_e einstellt. Allerdings nimmt die Dämmdicke d_1 der Installationsebene darauf keinen signifikanten Einfluss. Bei einer Verbesserung des U-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 d_1 der Installationsebene bei hochgedämmten, vorgestellten Außenwänden nach planerischen Gesichtspunkten gewählt werden. Wie in Abschnitt 3.1 dargestellt, könnte hierbei die Einhaltung des Schallschutzes eine Rolle spielen.

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. Um die Wärmebrückenwirkung und die Gefahr von Tauwasserausfall im Bauteilinneren gering zu halten, sollten allerdings nicht mehr als 20 % der Gesamtdämmstärke auf der zum Innenraum gerichteten Seite der Luftdichtheitsebene – d.h. in der Installationsebene – liegen [23]. Um den Wärmebrückeneinfluss möglichst gering zu halten, sollte versucht werden, die Deckeneinbindung durchgängig zu überdämmen.

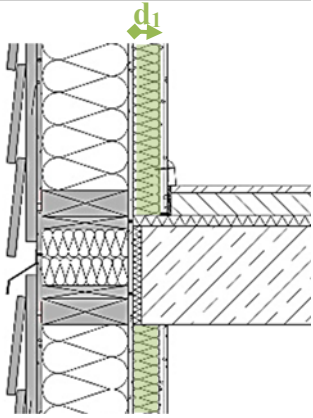
	Dämmdicke d_1 [mm]	U_m -Wert Bauteil [W/m ² K]	ψ_e [W/mK]
	40	0,137	0,058
	60	0,129	0,059
	75 (Basisdetail)	0,123	0,060
	80	0,122	0,060

Abb. 3.3: Parameterstudie Wärmebrückeneinfluss der Installationsebene: Anschlussdetail (links), Übersichtstabelle Berechnungsergebnisse (rechts) (Eigene Darstellung nach [24])

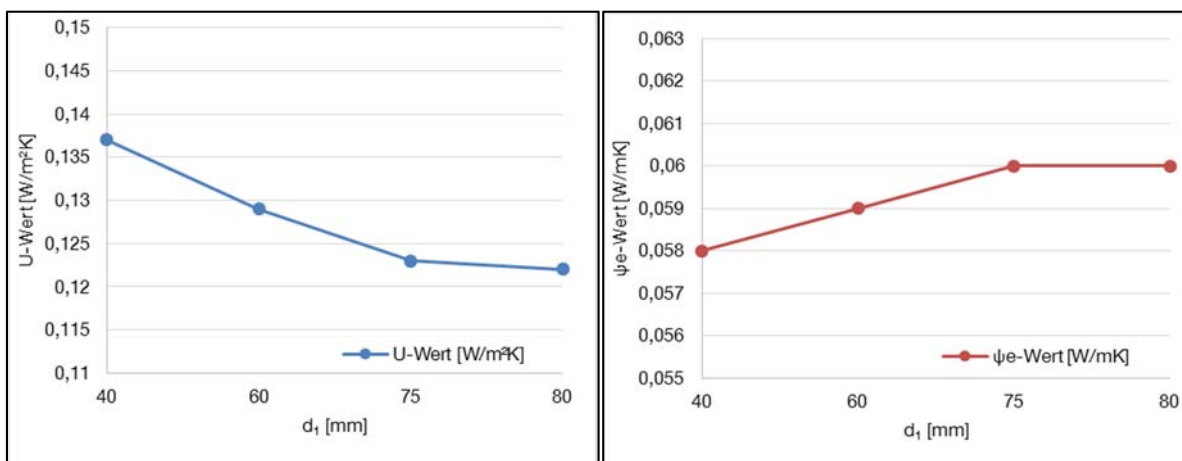


Abb. 3.4: U-Wert in Abhängigkeit der Dämmdicke d_1 (links); ψ_e in Abhängigkeit der Dämmdicke d_1 (rechts)

3.4 Lebenszyklusanalyse und Recyclingkonzepte

3.4.1 Grundlagen

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 (z.B. Stahl) eröffnen sich hier große Chancen für eine langfristig valide Bauweise. Die Hybridbauweise wurde hinsichtlich ihres Lebenszyklus qualitativ zum Thema Rückbaubarkeit und Recyclingfähigkeit und quantitativ in einer Ökobilanz untersucht.

3.4.2 Rückbaubarkeit und Recycling

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.

3.4.3 Vorgehensweise Lebenszyklusanalyse

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-Vorhangfassade untersucht. Auf der Grundlage der Beispielprojekte wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Standardaufbauten entwickelt, die hinsichtlich der gewählten Baustoffe in einer weiteren Ökobilanz analysiert wurden. Die Ökobilanzen nach ÖkobaDat 2011 wurden mit Hilfe des vom BBSR entwickelten Tools eLCA [25] berechnet. 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 keinen Betriebsenergiebedarf, da dieser für ein Einzelbauteil nicht sinnvoll ermittelt werden kann.

3.4.4 Ergebnisse der Ökobilanz / Variantenauswertung

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 Holzrahmenbauweise 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 (siehe Abb. 3.5). Hinsichtlich Treibhauspotenzial wurde errechnet, dass die mineralischen Außenwände und die Aluminium-Vorhangfassade mindestens 3,5-mal so viel Treibhauspotenzial über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren wie die Holzrahmenbau-Außenwände verursachen (siehe Abb. 3.6).

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.

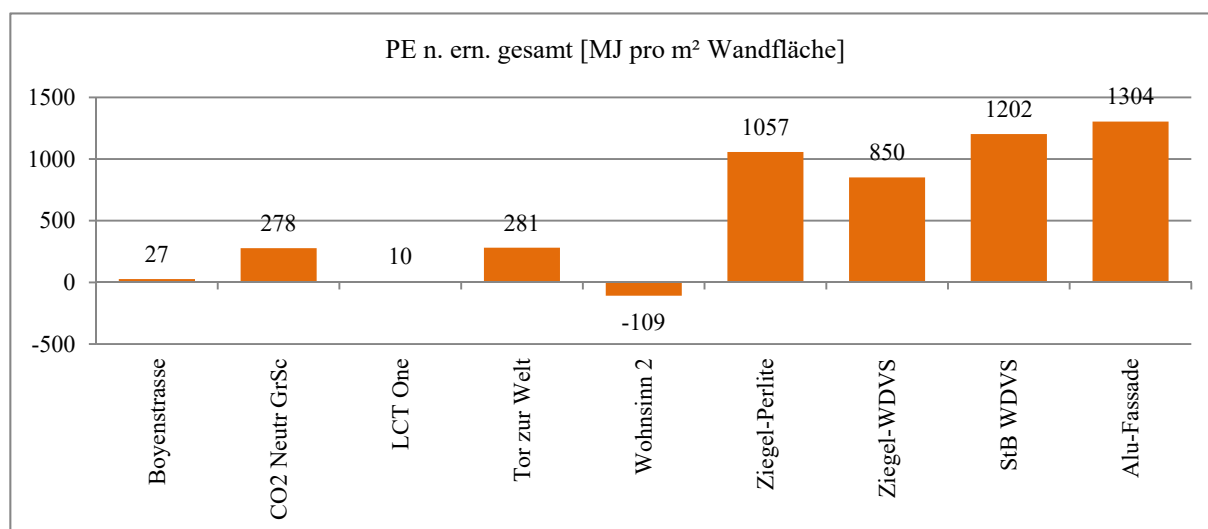


Abb. 3.5: Gesamtprimärenergiegehalt (nicht erneuerbar) der Referenzprojekte und Vergleichsfassaden

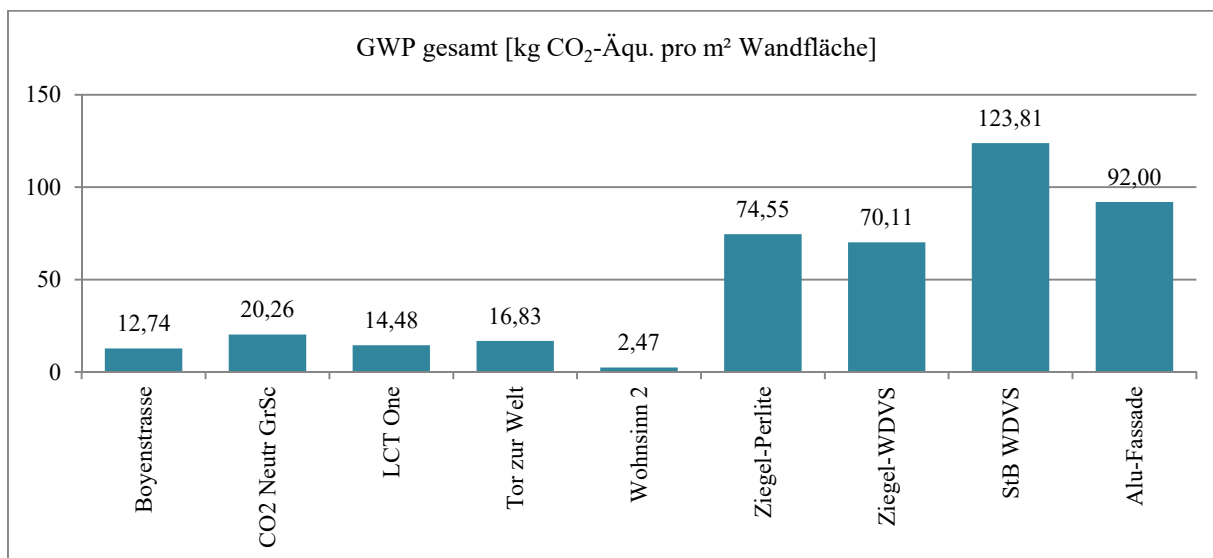


Abb. 3.6: Treibhauspotenzial der Referenzprojekte und Vergleichsfassaden

Als Bauteilkomponente ist bei den Holzrahmenbaufassaden für den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt und das Treibhauspotenzial das Kernelement ausschlaggebend, gefolgt von der Fassade. Die Installationsebene ist aufgrund des geringen Materialaufwandes weniger relevant, die Befestigungselemente fallen am geringsten ins Gewicht.

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Schnittstelle: Integrale Konzipierung von Anschlüssen

Mithilfe der Parameterstudien wurden Konstruktionsregeln für Anschlüsse im Rahmen der Hybridbauweise ermittelt. Dies wurde innerhalb eines iterativen Entwurfsprozesses unter Berücksichtigung fertigungs- und montagetechnischer Anforderungen erarbeitet. Die Varianten der Parameterstudien ergaben sich aus der Auswertung der Referenzprojekte, der Abstimmung mit Planern und Unternehmen der Bauindustrie sowie der projektbegleitenden Arbeitsgruppe.

Die Konstruktionsregeln wurden teilweise allgemein festgehalten und teilweise spezifisch für Dachanschlüsse, Geschossdeckenstoße und Sockelanschlüsse unterschiedlicher Art entwickelt. Zusammengefasst wurde alles in einem Konstruktionskatalog „Konstruktionskatalog - Fassadenelemente für Hybridbauweisen“ [26] mit dem Ziel ihn in den frühen Phasen der Planung als Grundlage verwenden zu können und die bisher vorhandenen Wissenslücken zu schließen. Ergänzend kann hierbei der Endbericht „Fassadenelemente für Hybridbauweisen – Vorgefertigte, integrale Fassadenelemente in Holzbauweise zur Anwendung im Neubau hybrider Stahlbetonhochbauwerke“ [27] herangezogen werden, welcher Hintergrundinformationen sowie ein Verständnis zur Einschätzung der statischen, bauphysikalischen und ökologischen Faktoren gibt.

Nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft einen im Konstruktionskatalog aufzufindenden Anschluss eines Geschossdeckenstoßes auf.

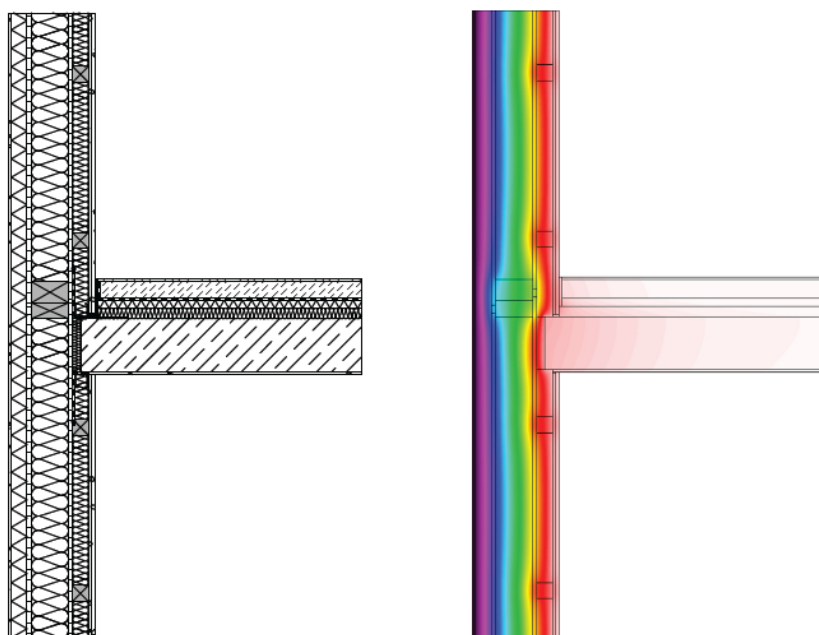


Abb. 4.1: Anschluss Geschossdecke - Außenwand, vorgestellt mit Darstellung des Isothermenverlaufs (Eigene Darstellung)

4.2 Pilotprojekt Städtischer Hartplatz Penzberg

Parallel zum Forschungsprojekt wurde das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Städtischer Hartplatz, Penzberg“ in Kooperation der TU München mit der Krämmel Wohn- und Gewerbebau GmbH, Wolfratshausen angestoßen [28]. Hierbei wird eine innovative und zugleich nachhaltige Wohnsiedlung geschaffen, die die Energie- und Klimaschutzkonzepte der Stadt Penzberg – Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um 40 % bis 2020 und energieautarke Stromversorgung – aufgreift. Das Wohnquartier wird im Niedrigstenergiestandard KfW-Effizienzhaus 55 ausgeführt, wobei der Jahresprimärenergiebedarf zusätzlich um weitere 25 % gesenkt werden soll. Bei dem Bauvorhaben wird die hybride Bauweise der massiven direkt gegenübergestellt, indem zwei von fünf Mehrfamilienhäusern mit nichttragenden Außenwänden in Holzrahmenelementbauweise 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.

5 Ausblick

Insgesamt konnte mithilfe des Forschungsvorhabens aufgezeigt werden, dass diese Art der Hybridbauweise - Kombination vorgefertigter nichttragender Holzfassadenelemente mit einem Stahlbetontragwerk - eine qualitativ hochwertige und energieeffiziente Alternativlösung 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 bleibt die Diskussion der Schnittstelle inklusive aller bauphysikalischen Aspekte sowie unter Berücksichtigung von Verformungsverträglichkeit. Hierbei dient der Konstruktionskatalog als Hilfestellung für die Planung und Ausführung.

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 Stahlbetonbauwerke eine einfache Demontierbarkeit der Fassade, wenn sie nicht mehr dem technischen oder ästhetischen Standard entspricht. Dadurch erhöht eine Holzrahmenbaufassade 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. Ein Monitoring weiterer Beispielprojekte könnte die gewonnenen Erfahrungen in Bezug auf die Hybridbauweise erweitern sowie eine wertvolle Validierung der Anwendung des Konstruktionskataloges bedeuten. Beispielprojekte könnten darüber hinaus dazu genutzt werden, Schallschutzversuche in-situ durchzuführen, um diese mit den Versuchsergebnissen zu vergleichen und gegebenenfalls weitere Varianten und Einflüsse messen zu können. Ebenso ist die Möglichkeit für die Verwendung von Holz-Beton-Verbund-Decken in das System noch zu integrieren und die Diskussion der Anschlüsse entsprechend zu erweitern.

6 Danksagung

Für die Förderung des Projektes möchten wir uns bei der Bayerischen Bauwirtschaft bedanken.

Besonderer Dank gilt der projektbegleitenden Arbeitsgruppe für das konstruktive Beitragen praxisorientierter Lösungsansätze. Die Arbeitsgruppe setzte sich aus Vertretern sowohl von Massivbauunternehmen (KETONIA Spannbeton-Fertigteilwerk GmbH, Geiger GmbH & Co. KG) als auch Holzbauunternehmen (Gumpp & Maier GmbH, Huber & Sohn GmbH & Co. KG, MERK Timber GmbH) zusammen. Im projektbegleitenden Ausschuss beratend mitgewirkt haben ebenfalls KRÄMMEL GmbH & Co. Verwaltungs KG sowie der Bayerische Bauindustrieverband e.V.

Weiterhin bedanken wir uns sehr für die konstruktive Unterstützung der jeweiligen Planungsbüros aller Referenzprojekte. Besonderer Dank geht hierbei an die Planungsbüros Architekten Hermann Kaufmann ZT GmbH, bauart Konstruktions GmbH & Co. KG, bof Architekten, Deimel Oelschläger

Architekten Partnerschaft und Trapez Architektur, deren Projekte als Grundlage für die Parameterstudien dienten.

7 Literaturverzeichnis

- [1] DIN 68800-2. (2012). *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [2] Kolb, J. (2007). *Holzbau mit System: Tragkonstruktion und Schichtaufbau der Bauteile*. Basel: Birkhäuser Verlag AG.
- [3] DIN 18203-3. (2008). *Toleranzen im Hochbau – Teil 3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [4] DIN 18202. (2013). *Toleranzen im Hochbau*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] DIN 4109. (2016). *Schallschutz im Hochbau - Teil 1: Mindestanforderungen; Teil 2: Rechnerische Nachweise der Erfüllung der Anforderungen*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [8] VDI 4100:2012-10. (2012). *Schallschutz im Hochbau – Wohnungen – Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [9] IS-ARGEBAU (2012). *Musterbauordnung – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012*. Abgerufen am 20.06.2016 von <https://www.is-argebau.de/lbo/VTMB100.pdf>.
- [10] Stein, R. (2015). *Zur Bewertung beeinflussender Faktoren auf Brandweiterleitungsmechanismen in Bauteilfugen vorgefertigter Holzelemente*. Dissertation. München: Technische Universität München.
- [11] DIN EN 1995-1-2. (2010). *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [12] DIN EN 1992-1-2. (2010). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [13] DIN EN 13986. (2015). *Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [14] DIN EN 13162. (2015). *Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) – Spezifikation*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [15] DIN EN 4102-17. (1990). *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Schmelzpunkt von Mineralfaser-Dämmstoffen Begriffe, Anforderungen, Prüfung*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

- [16] Loebus, S., Werther, N. (2014). *SmartTES - Innovation in timber construction for the modernisation of the building envelope - Book 5 Fire safety*. München: Technische Universität München, Fakultät für Architektur.
- [17] DIN 4108-2. (2013). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [18] 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, 24.07.2007.
- [19] DIN 4108 Beiblatt 2. (2006). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [20] DIN EN ISO 10211. (2008). *Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO 10211:2007)*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [21] DIN EN ISO 13370. (2008). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [22] DIN EN ISO 13789. (2008). *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient*. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.
- [23] holzbau handbuch R01 T03 F04. (1998). *Holzrahmenbau*. INFORMATIONSDIENST HOLZ. Bonn: Holzabsatzfonds (Hrgs.).
- [24] bof Architekten. (2013). *Bildungszentrum Tor zur Welt, Hamburg*. Planungsunterlagen (unveröffentlicht).
- [25] BBSR. (o.J.). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. eLCA. www.bauteileditor.de.
- [26] Stein, R., Dotzler, C., Schneider, P., Kleinhenz, M., Volz, C., Hessinger, J. (2016). *Konstruktionskatalog - Fassadenelemente für Hybridbauweisen* (unveröffentlicht). München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen & Lehrstuhl für Massivbau.
- [27] Stein, R., Schneider, P., Kleinhenz, M., Dotzler, C., Volz, C., Hessinger, J. (2016). *Fassadenelemente für Hybridbauweisen – Vorgefertigte, integrale Fassadenelemente in Holzbauweise zur Anwendung im Neubau hybrider Stahlbetonhochbauwerke* (unveröffentlicht). München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen & Lehrstuhl für Massivbau.
- [28] Kierdorf, D., Schneider, P., Dotzler, C., Schneegans, J., Stein, R., Lang, W. (2015). *Städtischer Hartplatz, Penzberg*. (unveröffentlichter Endbericht). München: Technische Universität München, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen und Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.