

Klimapositiver zirkulärer Holzbau

Rainer Vallentin

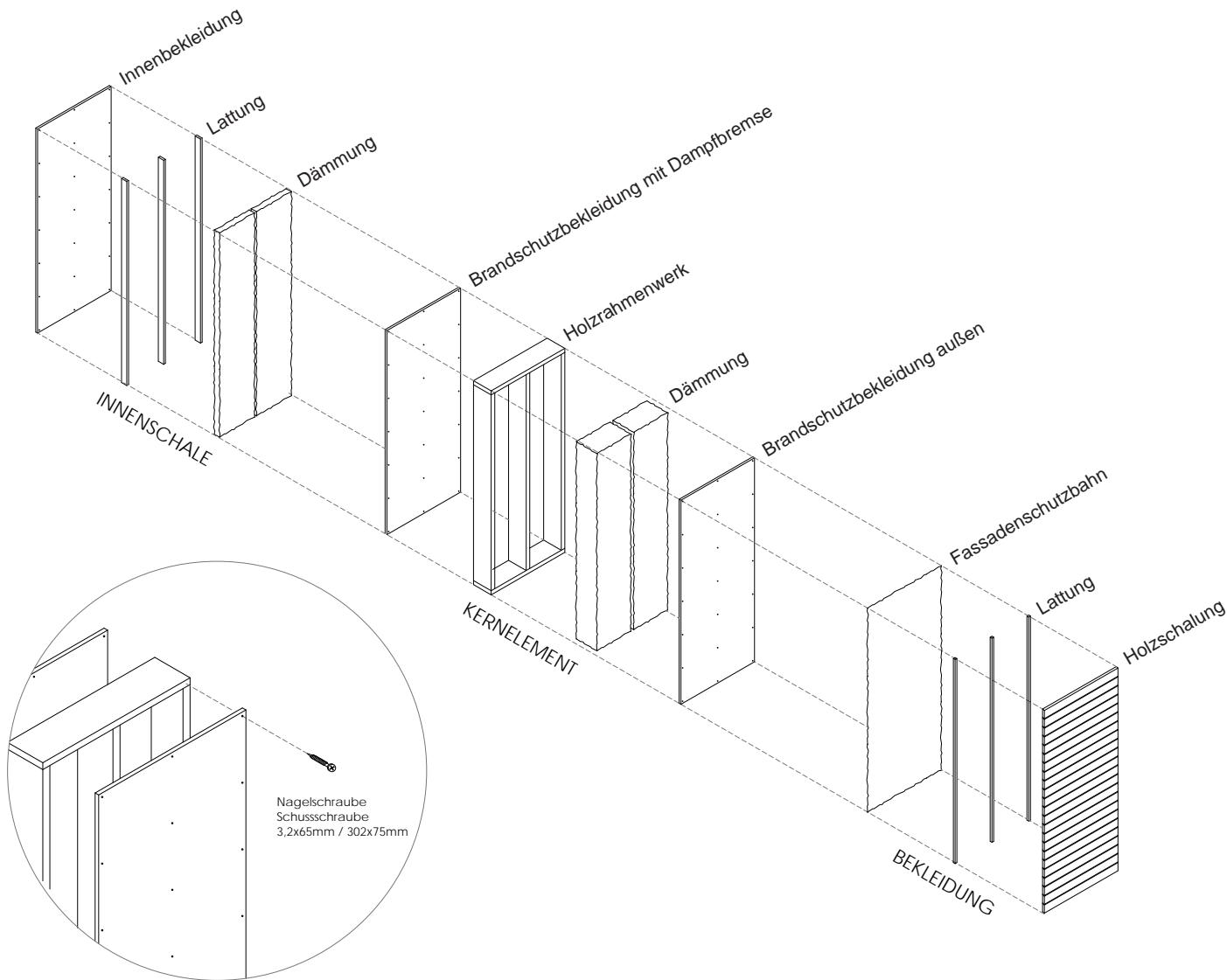
Ein pragmatisches Experiment



1

Konzeptskizze





Impressum

Klimapositiver zirkulärer Holzrahmenbau - Konzeptskizze
Ein pragmatisches Experiment

Bearbeitung:
Vallentin+Reichmann Architekten
Dr. Rainer Vallentin
Frei-Otto-Straße 10
D - 80797 München
Tel.: +49 (0) 89 / 244 058 76-0
Fax: +49 (0) 89 / 244 058 76-29
E-Mail: vallentin@vraie.de

Inhalt

Ziele der Untersuchung	3
Klimapositiver zirkulärer Holzrahmenbau - Von der Praxis zur Theorie und wieder zurück	4
Definitionen	6
Schlüsselkomponenten	7
Vorversuche	8
Hauptversuche	9
Nachfolgende (theoretische) Untersuchungen	28
Projektbeteiligte	30
Finanzplan / Nutzungsrechte / Literatur	31

Grafiken und Fotos: Vallentin+Reichmann Architekten
(andere Fotografen sind direkt bei den Abbildungen genannt)

Das Urheberrecht liegt bei den Autoren.

München, 02.10.2025

Motivation und Ziel der Untersuchung

Motivation

Der Holzbau bietet die Chance, „sich aus dem Klima- und Energieproblem herauszubauen“. Das gelingt dann, wenn das Bauen mit Holz und nachwachsenden Rohstoffen mit einer hohen Energieeffizienz und dem Wechsel von den fossilen Energiesystemen hin zu einer erneuerbaren Wärme- und Stromerzeugung verknüpft wird. Eine besondere Rolle können hierbei schnell nachwachsende Dämmstoffe, z.B. aus Stroh, spielen. Diese bewirken Negativemissionen, die sofort nach Einbau als CO_2 -Senken wirksam sind und damit das Klima entlasten (Abb. 2). Damit sind insgesamt „klimapositive“ Baukonstruktionen möglich. Sie sind Schlüsselbauteile für den Klimaschutz. Es ist daher wünschenswert, wenn Hüllkonstruktionen künftig vermehrt aus Holzrahmenwerken mit biogenen Dämmungen bestehen, sich als Standard durchsetzen und damit breite Anwendung finden können.

Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist, eine im o.g. Sinne klimapositive Holzrahmenkonstruktion zu bauen und anschließend alle Prozesse während des Lebenszyklus inklusive der Wiederverwendung nach dem Nutzungsende durchzuspielen. Den beiden Aspekten Robustheit und Dauerhaftigkeit wird dabei ein hoher Stellenwert einräumt. Anstelle eines „Prototyps“ wird eine gut und kostengünstig umsetzbare Standardkonstruktion entwickelt und in Form eines pragmatischen Experiments erprobt.

Am Ende werden alle für die Anwendung in künftigen Bauprojekten notwendigen Informationen zusammengestellt und für die Planer und Ausführenden zur Verfügung gestellt.

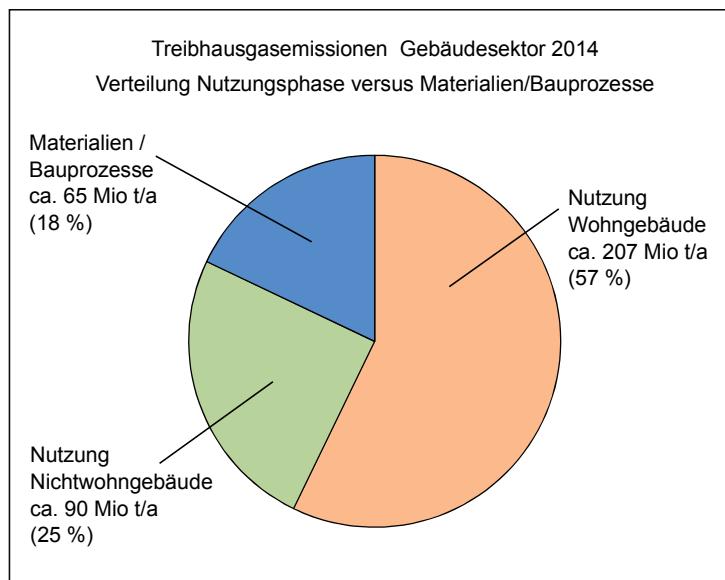


Abbildung 1:
Ungefähr 40 % der Treibhausgasemissionen Deutschlands im Jahr 2014 wurden durch den Gebäudesektor bei einer verursachergerechten Zuordnung verursacht. Dabei dominieren die energiebedingten Emissionen im Betrieb mit ca. 80 %, während die Materialbereitstellung und Bauprozesse etwa 20 % der gebäudebedingten Emissionen ausmachen.

Quelle: (BBSR 2020, S. 17)

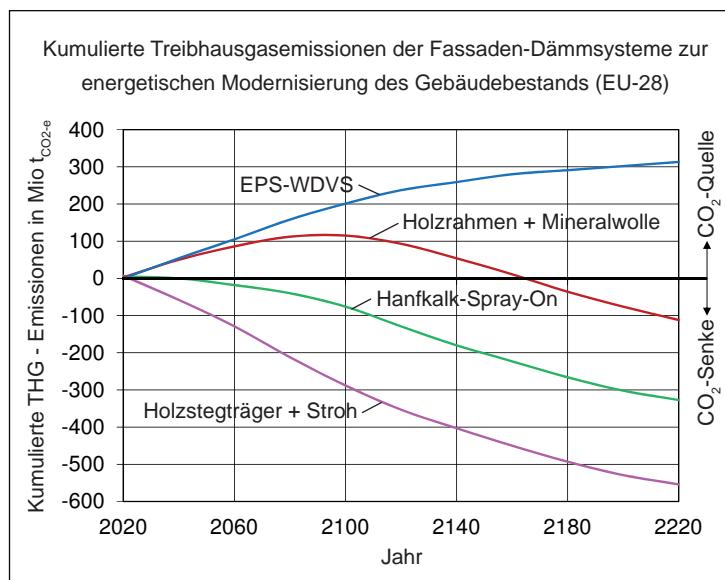


Abbildung 2:
Kumulierte Treibhausgasemissionen für die Herstellung der Fassadendämmelemente zur energetischen Modernisierung des Gebäudebestandes der EU-28-Staaten. Negative Werte bedeuten, dass die Konstruktion eine CO_2 -Senke darstellt und damit einen klimaentlastenden Effekt aufweist. Bei der Variante Holzstegträger + Stroh findet von Beginn an eine CO_2 -Senkenbildung statt.

Quelle: (Pittau et al. 2018)

Klimapositiver zirkulärer Holzrahmenbau - Von der Praxis zur Theorie und wieder zurück

Ausgangspunkt

In der Studie „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?“ (Vallentin 2024) konnte über theoretische Betrachtungen ein Lösungsansatz herausgearbeitet werden. Dieser kombiniert einen materialsparenden Holzbau mit den beiden klassischen Klimaschutzstrategien Energieeffizienz und dem Ausbau erneuerbarer Energien.

Zu Ende gedacht, hat dies eine Neuausrichtung des Holzbauwesens zur Folge:

- Statt auf den Tragkonstruktionen aus Holz liegt der künftige Schwerpunkt auf materialsparenden Holzhüllen mit einem sehr guten Wärmeschutz.
- Der Massivholzbau ist vor allem für statisch hoch belastete Bauteile prädestiniert, z. B. als Tragstruktur im mehrgeschossigen Wohnungsbau.
- Einen Schlüssel zur CO₂-Senkenbildung stellen schnell nachwachsende biogene Dämmstoffe (z. B. Stroh, Hanf, Schilf) oder Einblasdämmungen aus biogenen Recycling- bzw. Reststoffen (z. B. Zellulose, Holzfasern) dar. Diese weisen als sorptive Dämmstoffe feuchtetechnische Vorteile auf, benötigen sehr wenig Energie für die Herstellung und sind sofort nach dem Einbau als CO₂-Senke wirksam.
- Aus der Perspektive der CO₂-Senkeneffektivität stellt der Einsatz von Holz in möglichst langlebigen Baukonstruktionen den „Königsweg“ dar. Diese kann durch eine Kakadennutzung noch gesteigert werden. Das anzustrebende Ideal ist der dauerhafte Erhalt von Holz im Materialkreislauf.
- Künftige Holzkonstruktionen sollten im Sinne des „zirkulären Bauens“ prinzipiell weiterverwendbar, gut zerlegbar und frei von Problemstoffen sein. Dafür sind geeignete Konstruktionsansätze aufzuzeigen und zu entwickeln.

Die Schaffung umfangreicher CO₂-Senken durch das Bauen mit Holz und Nawaros gelingt nur über sehr lange Zeiträume, ist also eine generationenübergreifende Aufgabe. Grund ist, dass im Vergleich zu den heutigen Gebäudebezogenen Pro-Kopf-Emissionen von ca. 3,5 t/Pa die erzielbaren Pro-Kopf-Negativ-Emissionen um einen Faktor 10-50 niedriger liegen.

Daher sind zunächst die energiebezogenen Emissionen im gesamten Gebäudepark bis 2050 auf nahezu Null zu führen. Nur dann kann gerade noch rechtzeitig ein langfristiges Senkenregime (Stichwort: „Waldbaupumpe“) als Reparaturmechanismus für das Klima wirksam werden (vgl. Schellnhuber 2022).

Klimapositive Holzhüllen

In der o.g. Studie konnte ferner gezeigt werden, dass Holzfassaden mit Passivhausqualität in Verbindung mit schnell nachwachsenden Dämmstoffen und einer Wärmepumpenheizung als insgesamt klimapositive Bauteile wirksam sind. Dies gilt bei einer dynamischen Bilanzierung der fossilen und biogenen Emissionen über den Lebenszyklus. Voraussetzung ist ferner eine lange Lebensdauer der Holzfassade von 80 Jahren und mehr (siehe Tabelle 1).

Zirkuläre Konstruktionen

Für die CO₂-Senkenstrategie ist es auf lange Sicht von Bedeutung, die biogenen Materialien, die im Materiallager der Gebäude Stück für Stück eingespeichert werden, am Ende der Nutzung nicht zu verbrennen (= Standard in Ökobilanzen nach spätestens 50 Jahren). Statt dessen sind sie wieder in den Ma-

terialkreislauf zurückzuführen und für eine nächste Nutzungssperiode zur Verfügung zu stellen. Für Gebäude heißt dies, im Sinne einer Kaskadennutzung, biogene Materialien entweder direkt wiederzuverwenden oder sie in dafür geeignete Herstellungsprozesse zurückzuführen zu können. Es ist eine eigenständige Konstruktionsaufgabe, Bauelemente so zu konzipieren, dass sie dafür geeignet sind.

Großes Anwendungsspektrum

Die gewählte Konstruktion basiert auf mit einlagigen Bekleidungen/Beplankungen versehenen Holzrahmenelementen. Für diese existiert eine Bauartgenehmigung für Fermacell-Gipsfaserplatten, die ausdrücklich die Verwendung von normal entflammbaren Dämmstoffen zulässt. Diese Bauart hat folgenden Einsatzbereich für Holzfassaden:

- Gebäudeklasse 1 - 3: tragend und nichttragend
- Gebäudeklasse 4 + 5: nichttragend
- Energetische Modernisierungen von Massivbauten im Bestand (im Rahmen des baurechtlich Möglichen)

Untersuchungsdesign

Die Untersuchung beginnt bewusst mit einem pragmatischen Experiment, um zügig die Machbarkeit und alle praktischen Fragen für eine sofortige Anwendung zu klären. Die theoretischen Betrachtungen erfolgen erst im Anschluss und betreffen Fragen der Bilanzierung, Verfügbarkeit, Bauphysik, Dauerhaftigkeit und Kosten. In diesem Zuge soll auch ein Überblick über das zirkuläre Bauen mit Holz gegeben werden.

Abschließend wird erörtert, wie sich über klimapositive Gebäudehüllen mit biogenen Baumaterialien eine neue Baupraxis als wichtiger Beitrag zum Klimaschutz etablieren lässt und welche Voraussetzungen hierfür geschaffen werden müssen.

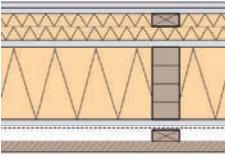
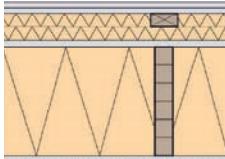
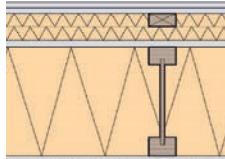
			
Konstruktion	Holzrahmen 6/16 cm Zellulose	Holzrahmen 4/24 cm Zellulose	Holzstegträger 6/24 cm Stroh
U-Wert (W/mK)	0,23	0,15	0,16
Wärmeverlust (kWh/m ² a)	19,3	12,5	13,4
Biogene Masse (kg/m ²)	46	50	67
Kohlenstoffgehalt (kg/m ²)	20	22	29
Verbautes Holz (kg/m ²)	29	29	24
Biogene Dämmung (kg/m ²)	8	12	33
GWP(fossil) Konstruktion (kg/m ²)	+ 15,3	+ 15,5	+ 15,1
Treibhausgasemissionen der Konstruktion (50 / 80 / 100 Jahre)			
GWP Konstruktion (kg/m ²)	+ 3,9 / - 12,0 / - 26,2	- 5,6 / - 21,2 / - 34,9	- 14,1 / - 37,5 / - 58,6
Treibhausgasemissionen der Wärmepumpenheizung (50 / 80 / 100 Jahre)			
GWP Wärmepumpe (kg/m ²)	+ 45,4 / + 48,7 / +49,5	+ 29,6 / + 31,8 / + 32,9	+ 31,5 / + 33,8 / +34,4
Gesamte Treibhausgasemissionen (50 / 80 / 100 Jahre)			
GWP Gesamt (kg/m ²)	+ 49,3 / + 36,7 / + 23,3	+ 23,8 / + 10,8 / - 2,6	+ 17,4 / - 3,7 / - 24,2

Tabelle 1: Drei Holzkonstruktionen und die im Lebenszyklus ausgelösten Treibhausgasemissionen je Quadratmeter Bauteil im Vergleich. Bei der Variante Stroh + Holzstegträger ergibt sich bei langen Nutzungsdauern sogar inklusive der Emissionen der Wärmepumpe eine insgesamt klimapositive Holzhülle. Berechnungen mit dem GWP(bio)-Index.

Beim Vergleich geht es um den „Weg“ von einer Holzkonstruktion mit mittlerer energetischer Qualität (z.B. gem. GEG mit $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$) hin zu einer hohen energetischer Qualität (Effizienzhaus-40 bzw. Passivhaus mit $U = \text{ca. } 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$), bei gleichzeitig konstantem oder reduziertem Holzeinsatz aufzuzeigen.

Die Berechnungen wurden getrennt für die Treibhausgasemissionen der Konstruktion, der Wärmepumpenheizung und der Summe aus beiden Beiträgen während eines Lebenszyklus von 50 (blau), 80 (grün) und 100 (rot) Jahren durchgeführt.

Mit der Verbesserung des Wärmeschutzes und mit steigender Lebensdauer der Holzrahmen-Außenwand werden die resultierenden Treibhausgasemissionen immer geringer. Quelle: abgewandelt nach [Vallentin 2024].

Definitionen

Klimapositives Bauteil

Über den Lebenszyklus im Saldo als CO₂-Senke wirksames Bauteil. Berücksichtigt werden Herstellung, Betrieb (insbesondere die Heizenergie), Wartung und Instandsetzung sowie der Rückbau. Angesichts der mittleren Lebensdauer der Wohngebäude von im Mittel 120 Jahren (Feist/Krick 2024) umfasst die Bilanzierung einen Zeitraum von wenigstens 100 Jahren. Dabei ist einerseits die Dynamik der wirtschaftlichen Transformation in Richtung Klimaneutralität und andererseits die Dynamik der biogenen Emissionen zu berücksichtigen.

Zirkuläres Bauteil

Bei einem zirkulären Bauteil sind alle wesentlichen Komponenten wiederverwendbar oder können in hohem Maße (größer 50 %) in den Herstellungsprozess rückgeführt werden. Gerade bei kohlenstoffhaltigen Materialien ist deren Erhalt im Materiallager der Gebäude oder an anderer Stelle für den Erhalt als CO₂-Senke und damit für den Klimaschutz von Bedeutung. Eine Verbrennung am Ende der Nutzungsphase wird daher ausgeschlossen. Ausgeklammert wird die offene Frage des Verlustes von Zulassungen von Baukomponenten nach deren Rückbau.

Pragmatischer Klimaschutz

Unter heutigen Randbedingungen (Verfügbarkeit, Baurecht, Normen/Zulassungen, Kosten, Praxistauglichkeit) sofort umsetzbarer Klimaschutz. Es soll bewusst vermieden werden, neue Prototypen zu entwickeln, deren breite Umsetzung fraglich und für deren Einführung viele Jahre benötigt werden. Ziel

ist es, eine Standardlösung aufzuzeigen, die zwar die Klimaschutzanforderungen erfüllt, jedoch darüber hinaus substantielle Vorteile z.B. hinsichtlich Lebenszykluskosten, Bauphysik, Robustheit und einfacher Umsetzung aufweist und zugleich ein möglichst großes Anwendungsspektrum besitzt.

Pragmatisches Experiment

Ausgangspunkt ist ein praktischer Versuch, der zunächst die prinzipielle Machbarkeit abklärt, um darauf aufbauend theoretische Fragestellungen zu untersuchen. Hintergrund hierfür ist, dass die sofortige und voraussetzungslose Umsetzung angesichts der Dringlichkeit des Klimaschutzes Priorität haben muss.

Vor dem praktischen Versuch können und sollen Vorversuche stattfinden, in denen jeder Teilschritt ausprobiert wird, um das Experiment unter typischen Produktionsbedingungen durchführen zu können. Besonders interessiert hierbei die problemlose Fertigung, Wartung, Instandsetzung und Rückbaubarkeit sowie die Materialkosten und der erforderliche Zeitaufwand für jeden Teilschritt. Auf diese Art und Weise soll der Aufwand für die Herstellung einer klimapositiven und zirkulären Holzhülle minimiert werden.

Es wird jedoch anerkannt, dass Experimente immer theoretische Voraussetzungen haben, z.B. im Hinblick auf Messtechnik und Materialkunde. Im letzten Schritt wird ausgehend von den theoretischen Untersuchungen die künftige Anwendbarkeit unter den verschiedenen Randbedingungen beleuchtet, wie sie in der Praxis unvermeidlich vorkommen. Das betrifft vor allem die energetischen Modernisierungen im Bestand.

Schlüsselkomponenten

Materialeffizienter Holzrahmenbau

Als Trag- bzw. Stützkonstruktion der Außenwand dient ein gebräuchliches Holzrahmenwerk. Dieses soll möglichst materialsparend ausgeführt werden, um die Ressource Holz zu schonen. In Frage kommen hierbei schlanke KVH- bzw. BSH-Querschnitte oder Holzstegträger. Die Verbindungen des Rahmenwerks werden mit leicht lösbar den Verbindungen ausgeführt, um einen späteren Rückbau zu ermöglichen.

Stroh-Einblasdämmung

Einblasdämmungen gehören zu den kostengünstigsten Dämmungen überhaupt. Dies liegt an der einfachen Einbringmethode, die in der Lage ist, auch komplexe Hohlraumgeometrien vollständig auszudämmen. Weil sie nur von zertifizierten Verarbeitern eingebaut werden dürfen, weisen sie zugleich eine hohe Verarbeitungsqualität auf.

Schnell nachwachsende biogene Dämmungen wie Stroh sind darüber hinaus sofort nach Einbau als CO₂-Senke wirksam.

Biogene Dämmungen weisen als sorptive Materialien eine günstige Feuchteregulierung auf, weil sie Feuchte aufnehmen, speichern und im Material verteilen können. Dies erweist sich im Falle auftretender höheren Materialfeuchten als Vorteil gegenüber konventionellen Dämmstoffen, wie z.B. Mineral- oder Glaswolle. Im Holzbau wird damit z.B. bei kritischen Bauteilaufbauten bzw. Anschlüssen, bei unerkanntem Baufeuchteintrag oder geringfügigen Leckagen in der Nutzungsphase die feuchtechnische Robustheit der Konstruktionen erhöht. Sie leisten damit einen Beitrag zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit.

Gipsfaserplatten

Gipsfaserplatten erfüllen mehrere Funktionen gleichzeitig (z.B. Brandschutzbekleidung, statisch wirksame Beplankung, Bildung von Gefachen, Schutzbekleidungen) und sind dadurch im Holzbau vielfältig einsetzbar. Dies ist auch vorteilhaft hinsichtlich Kosten und Lagerhaltung. Die Platten sind stabil, brechen nicht so leicht wie Gipskartonplatten und lassen sich einfach verarbeiten.

Durch die Verwendung von Altpapier als Faserbewehrung dürfen Gipsfaserplatten als teilbiogener Baustoff eingestuft werden. Wegen der Homogenität des Plattenwerkstoffs können Gipsfaserplatten wiederverwendet oder besonders einfach in den Herstellungsprozess zurückgeführt werden. Die Beimischung von Rest- und Altmaterial beträgt aktuell 18 % und kann auf bis zu 80 % gesteigert werden.

Wiederlösbar Verbindungsmitte

Eine Wiederverwendung der verschiedenen Baukomponenten hängt entscheidend von lösbar den Verbindungsmitte ab. Insbesondere die Verwendung der heute üblichen Klammern führt dazu, dass Beplankungen bzw. Bekleidungen nicht zerstörungsfrei demontiert werden können. An dieser Stelle sind alternative Lösungen zu suchen, die mit einem vergleichsweise niedrigen Zeitaufwand wie bei dem Klammern ausgeführt werden können, z.B. magazinierte Nagelschrauben. Eine nur teilweise geklärte Frage betrifft die Wiederlösbarkeit nach den langen Nutzungszeiten der Bauteile von 80 - 200 Jahren, nachdem diese verschiedenen Beanspruchungen (z.B. Feuchtewechseln, statischen Belastungen) ausgesetzt waren.



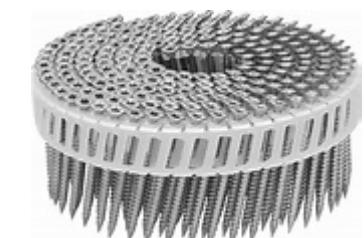
Materialeffizienter Holzrahmenbau



Stroh-Einblasdämmung



Gipsfaserplatten



Nagelschrauben

Vorversuche

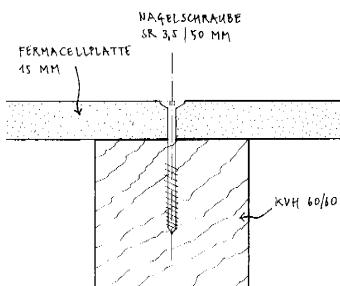
In den Vorversuchen sollen Einzelfragen geklärt werden, die abgetrennt vom Hauptversuch hinsichtlich prinzipieller Ausführbarkeit, geeigneter Werk- und Halbzeuge sowie optimierter Arbeitsabläufe von Bedeutung sind.

Nagelschrauben

Hierbei soll erstens ausprobiert werden, wie die Gipsfaserplatten mit Nagelschrauben in Vollholzprofile befestigt werden können, ohne sie dabei zu beschädigen. Als nächster Schritt soll getestet werden, ob sich die Nagelschrauben im Anschluss gut justieren und wieder herausschrauben lassen. Nach dem Lösen der Platte werden die Nagelschrauben, das Holzprofil und die Fermacellplatte im Hinblick auf Zustand und Beschädigungen begutachtet. Als letzter Schritt soll versucht werden, die Fermacellplatte ein zweites Mal zu befestigen.

Geplanter Ablauf:

- Klärung, welche Nagelschrauben gem. Zulassung ETA-03/0050 geeignet sind + erforderlicher Randabstände
- Einbringen Nagelschrauben mit Nagelschussapparat
- Nachjustieren
- Herausschrauben
- Platte entfernen, inkl. Zustandfeststellung / Dokumentation
- Mit versetzter Anordnung der Nagelschrauben die Platte wiederbefestigen + Verspachteln alte Schraublöcher



Nagelschraubenversuch

chen Gipsfaserplatten sind dagegen geeignete Maßnahmen (z.B. Druck-Entlastungsöffnungen) zu treffen. Die nächste Frage betrifft das Herstellen, Verschließen und Wiederöffnen der Einblasöffnungen und deren spätere Auffindbarkeit. Schließlich ist zu testen, wie der Ausblasvorgang, die Zwischenlagerung und der Wiedereinbau ablaufen und ggf. optimiert werden können.

Geplanter Ablauf:

- Klärung Maßnahmen zur Vermeidung von Plattenbrüchen
- Einbringen Stroh-Einblasdämmung
- Schließen Einblasöffnungen (inkl. Funktionserhalt Luftdichtung und Dampfbremse + spätere Wiederauffindbarkeit)
- Öffnen Einblasöffnungen
- Ausblasen Strohdämmung inkl. Zustandsfeststellung / Dokumentation
- Wiedereinblasen und Schließen Einblasöffnung

Erneuerung Fenster und Fassadenbehang

Während des Lebenszyklus sind Fenster und Fassadenbehang ein- oder zweimal zu erneuern. Zu klären ist, wie dies mit möglichst geringen Beschädigungen erfolgen kann und inwieweit hierbei die vorhandenen Befestigungen, Abklebungen und Abdichtungen so ausgebildet sind, dass einerseits der Aufwand minimiert werden kann und eine Weiterverwendung bzw. ein Recycling der ausgebauten Komponenten möglich sind.

Geplanter Ablauf:

- Ausbau Fenster und Rückbau Holzfassade inkl. Lattung und Fassadenschutzbahn
- Zustandsfeststellung / Dokumentation
- Wiedereinbau Fenster und Holzbehang inkl. Anschlüsse

Hauptversuche

Vorbild: Mock-Up

Fassadenmodelle im Maßstab 1/1 sind inzwischen weit verbreitet und haben die Funktion, den Fassadenaufbau mit seinen Anschlüssen baupraktisch zu erproben und dabei die geometrisch und/oder ausführungstechnisch schwierigen Stellen vor der Bauausführung zu klären. Besonders sinnvoll ist dies bei einer weitgehenden Vorfertigung der Fassadenelemente.

Im Grunde eignen sie sich auch sehr gut zur Abklärung der Rückbauprozesse, weil sie nach ihrer Zweckerfüllung als Demonstrationsobjekt in der Werkhalle oder auf der Baustelle ohnehin wieder zerlegt werden müssen.

Einfaches Holzrahmenwerk (Kernelement ohne Einbauten)

Ein erster Versuch umfasst vorerst nur das Kernelement, bestehend aus Rahmenwerk, Bekleidung und Einblasdämmung. Hier soll unter Praxisbedingungen ein Wandelement ohne Öffnungen und Einbauten gefertigt, rückgebaut und wiederaufgebaut werden. Das Kernelement ist insofern besonders wichtig, weil dieses durch den Fassadenbehang und die Installationsebene gut geschützt wird und dadurch eine Lebensdauer wie das Gebäude insgesamt erwarten lässt.

Holzrahmenwerk mit Fenster, Holzbehang und Installationsebene

Nachdem eine Fassade aber nicht nur aus den geschlossenen Kernelementen besteht, soll der eigentliche Hauptversuch auch ein komplettes Fassadenelement mit Fassadenbehang, Fenster und Installationsebene umfassen. Dabei spielt eine besondere Rolle, dass der Fassadenbehang und die Installationsebene im Gebäudelebenszyklus ein bis zwei Mal erneuert werden

müssen. Einerseits ist die Lebensdauer der frei bewitterten Holzschalung deutlich kürzer, als die des Kernelementes. Andererseits erreichen Installationen (hier vornehmlich Elektroleitungen und -einbauten) nach etwa 50 - 60 Jahren das Ende ihrer Nutzungszeit. Hier findet sich sogleich die Begründung für die Ausbildung einer Installationsebene, weil diese weitestgehend eine Leitungsführung unabhängig vom Kernelement und damit auch einfache spätere Änderungen und Erneuerungen zulässt.

Dies kann auch in Form von Teilver suchen nur den Fassadenbehang inkl. Fensterausch und den Rückbau (siehe entsprechender Vorversuch) bzw. die Erneuerung der Installationsebene umfassen ohne dabei das Kernelement anzufassen.

Zu prüfen ist insbesondere, welche Umstände/Kleinigkeiten, die bei den Vorversuchen nicht erfasst/erkannt wurden einer Wiederverwendung dienlich oder hinderlich sind.

Ablauf und Untersuchungsparameter

- Aufbau des Fassadenelements
- Rückbau des Fassadenelements
- Zustandsfeststellung der zerlegten Komponenten und Dokumentation
- Wiederaufbau des Fassadenelements
- Bewertung und Dokumentation jedes Einzelschrittes mit Erfassung Zeitaufwand, Arbeitsmitteleinsatz, Beschreibung günstiger und schwieriger bzw. kritischer Arbeitsschritte, Foto- bzw. Filmdokumentation
- Bewertung der Wiederverwendbarkeit bzw. des Recyclingpotentials sowie der Materialverluste
- Gesamtbewertung (Praxistauglichkeit / Aufwand)

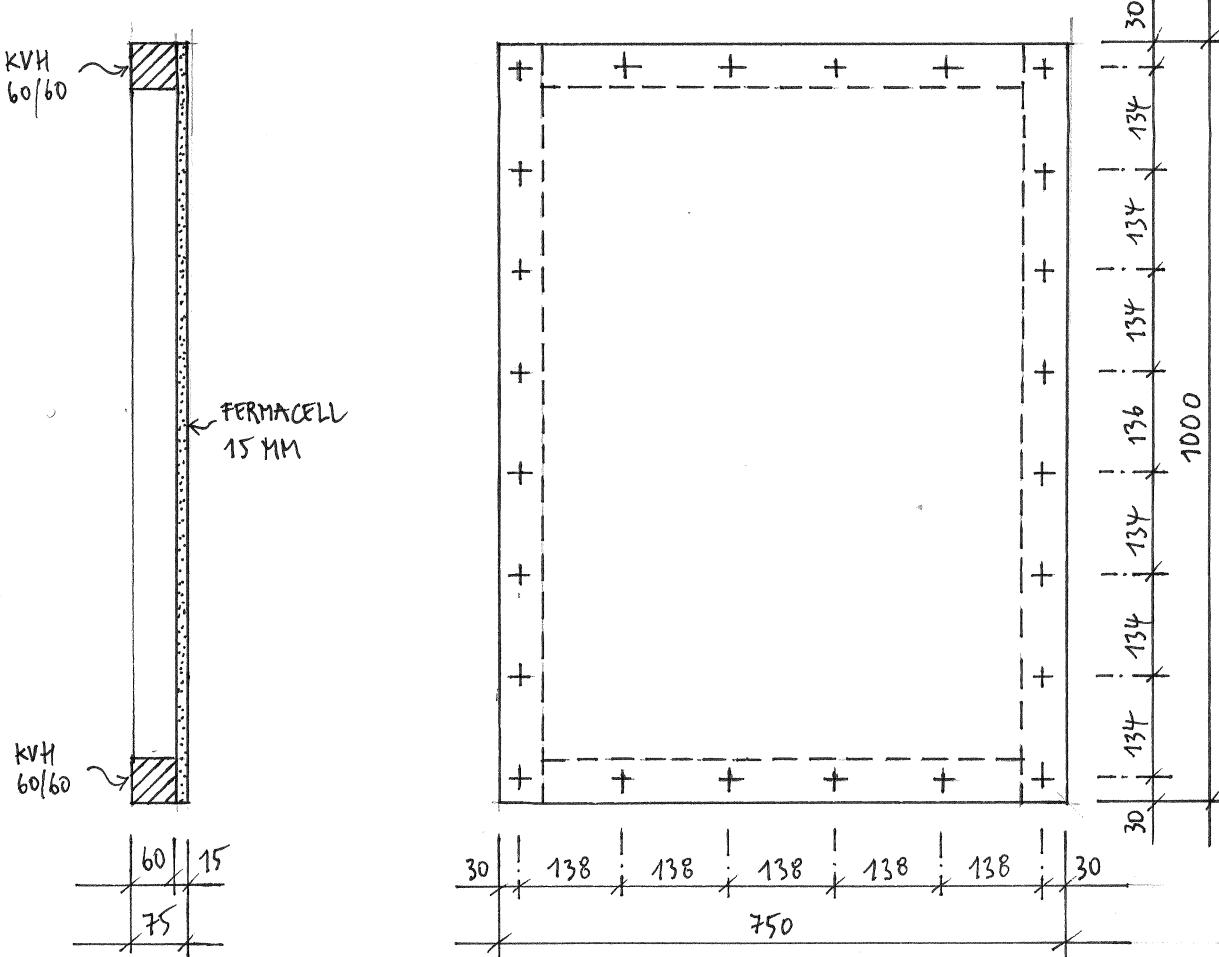


Fassadenmodell 1/1 (Mock-Up) als Vorbild für den Hauptversuch

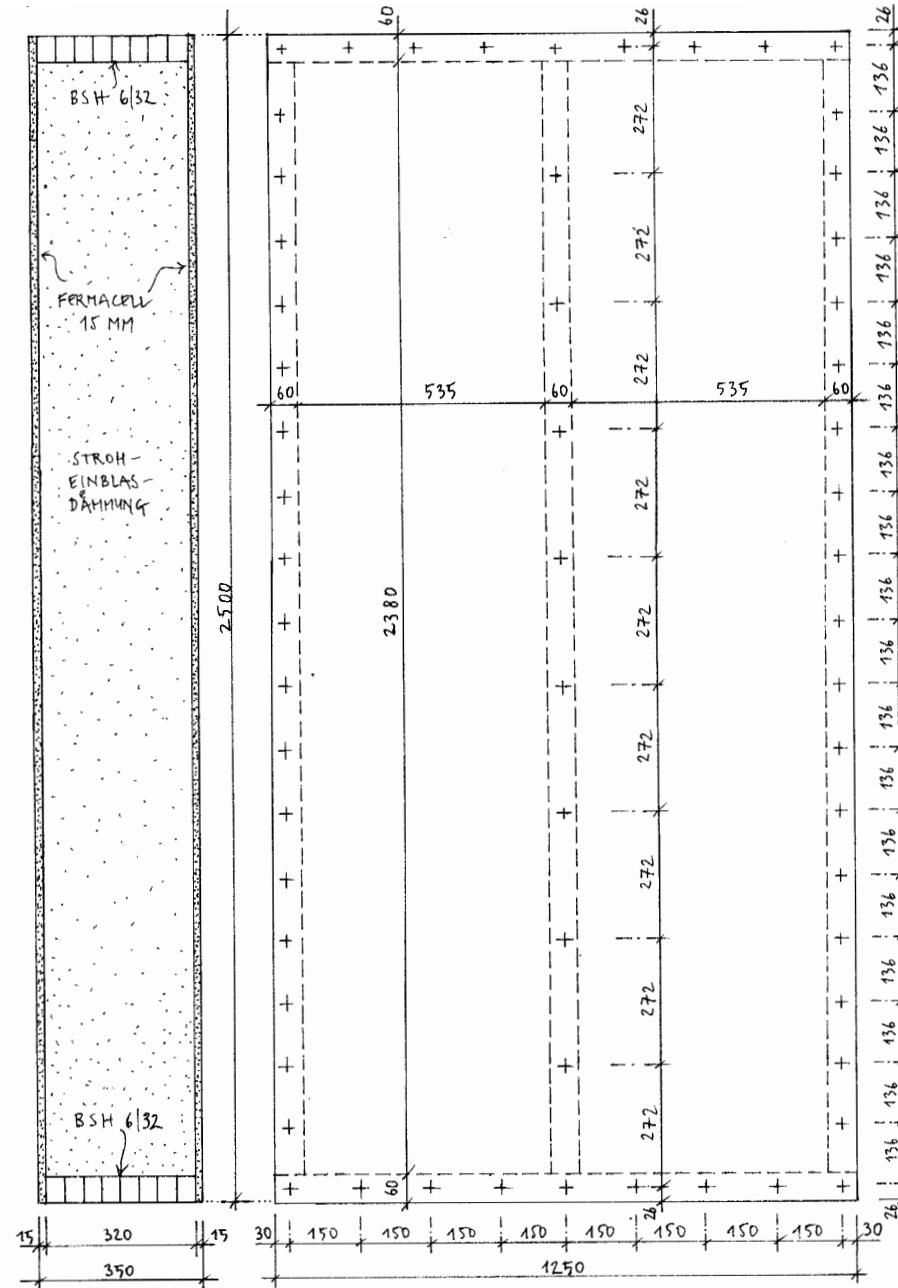
Zeichnungen

Materialliste

- 2 Stk. KVH 60/60 mm, L = 100 cm
- 2 Stk. KVH 60/60 mm, L = 69 cm
- 1 Stk. Fermacellplatte, 15 mm, 75 x 100 cm je Versuch
- 4 Stk. Stahlwinkel 60/60/2 mm
- 24 Nagelschrauben je Versuch



Zeichnung 1: Vorversuch mit Nagelschrauben



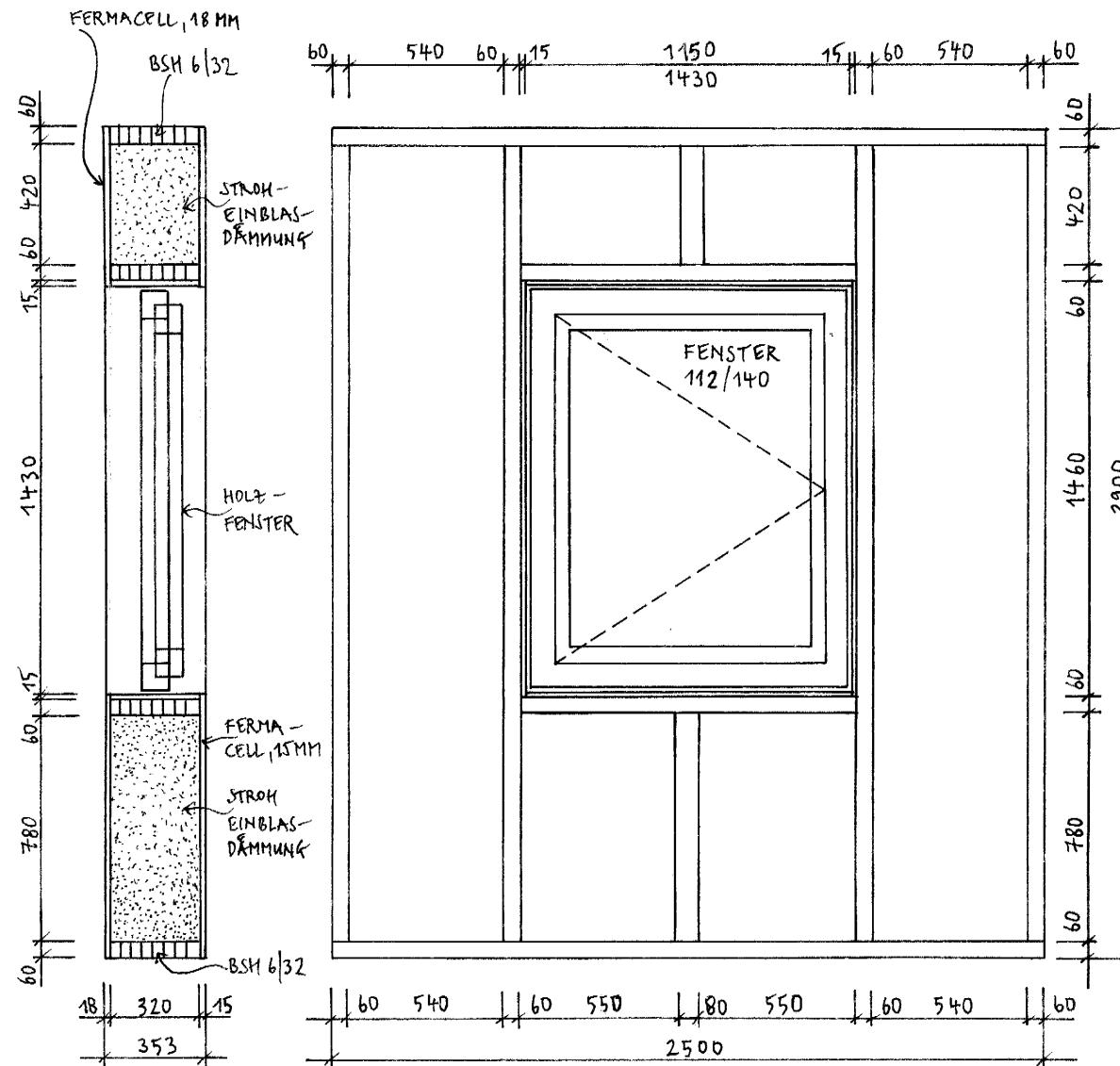
Zeichnung 2: Hauptversuch mit Rahmenwerk ohne Öffnung (Stroh-Einblasdämmung / Nagelschrauben bzw. Schnellbauschrauben)

Materialliste

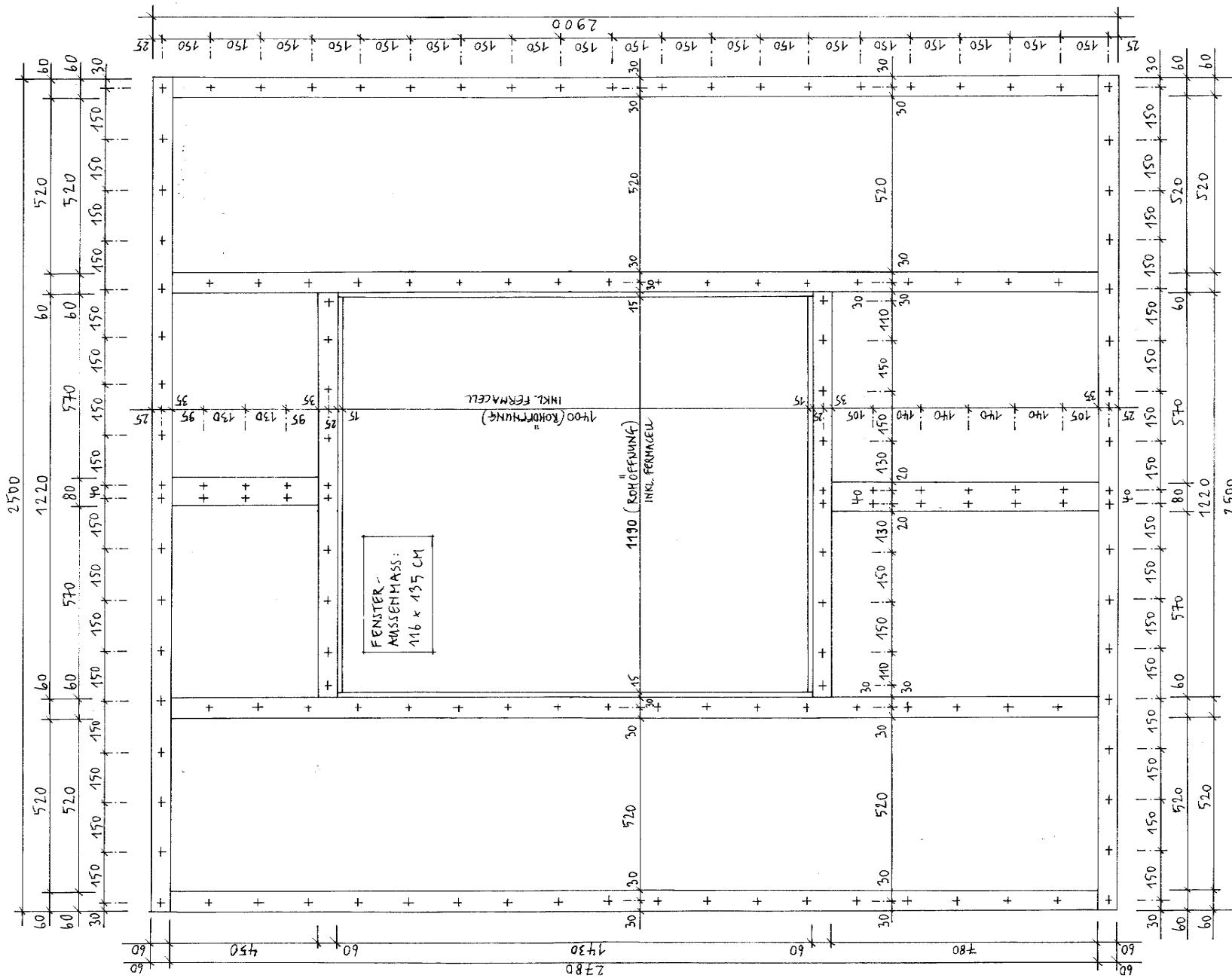
- 2 Stk. BSH 6/32, L = 125 cm
 - 5 Stk. BSH 6/32, L = 238 cm
 - 2 Stk. Fermacellplatte, 15 mm,
125 x 250 cm
 - Verschraubung Rahmenwerk
(noch zu klären)
 - geeignete Schrauben gem.
ETA-03/0050, 120 Stk.
 - Stroh-Einblasdämmung,
ca. 0,85 m³

Materialliste

- 2 Stk. BSH 6/32, L = 250 cm
 - 4 Stk. BSH 6/32, L = 278 cm
 - 1 Stk. BSH 8/32, L = 78 cm
 - 1 Stk. BSH 8/32, L = 42 cm
 - 2 Stk. BSH 6/32, L = 146 cm
 - 2 Stk. Fermacellplatte, 15 mm,
125 x 300 cm
 - 2 Stk. Fermacellplatte, 18 mm,
125 x 300 cm
 - Verschraubung Rahmenwerk
(noch zu klären)
 - Schrauben 3,9 x 50 gem.
ETA-03/0050, 296 Stk.
 - Stroh-Einblasdämmung
 - Fenster, 112 x 140 cm



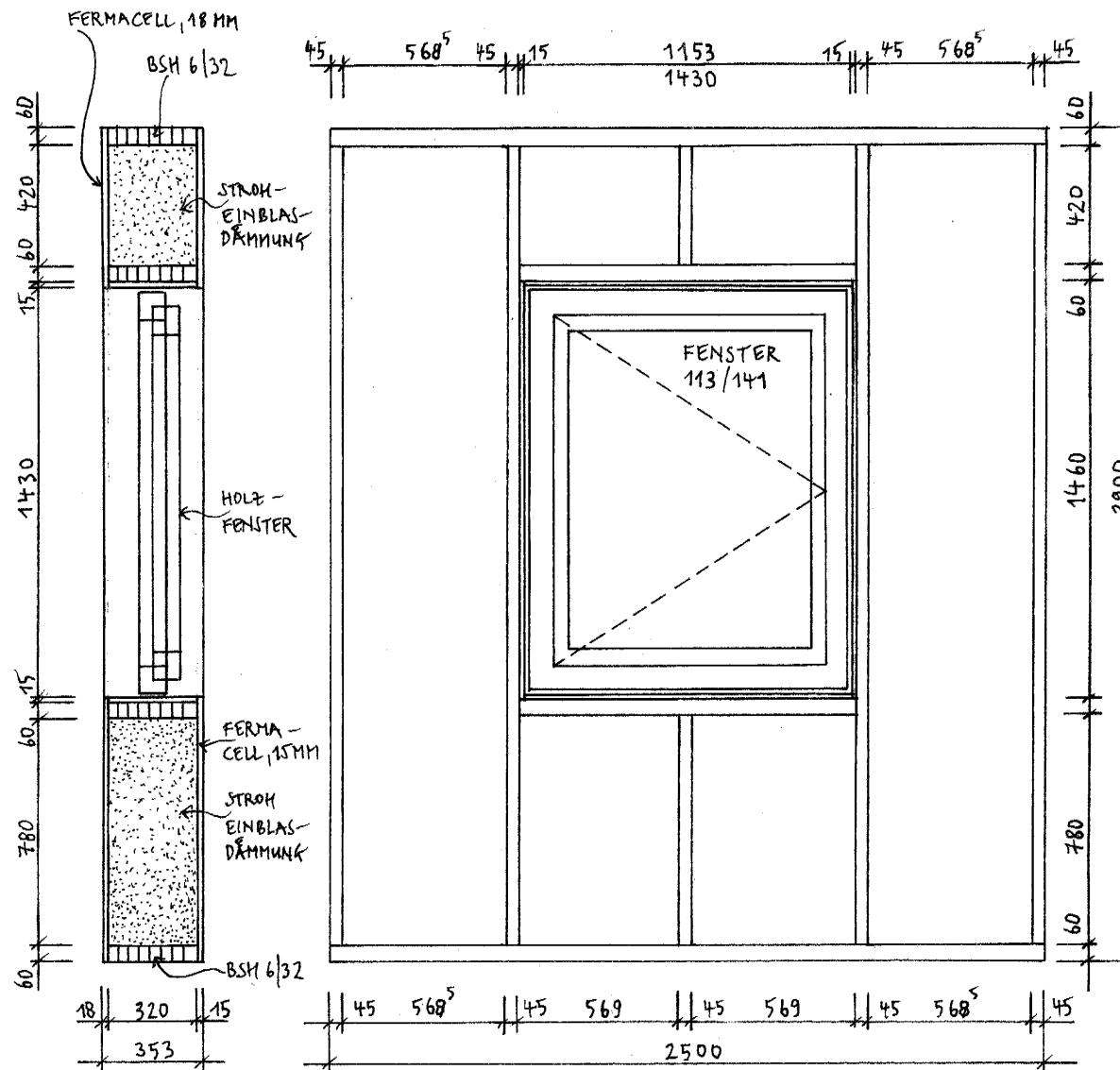
Zeichnung 3: Hauptversuch Rahmenwerk mit Fenster (Variante mit Schrauben)



Zeichnung 3A: Hauptversuch Rahmenwerk mit Fenster (mit Schraubenbild)

Materialliste

- 2 Stk. BSH 6/32, L = 250 cm
- 4 Stk. BSH 4,5/32, L = 278 cm
- 1 Stk. BSH 4,5/32, L = 78 cm
- 1 Stk. BSH 4,5/32, L = 42 cm
- 2 Stk. BSH 6/32, L = 146 cm
- 2 Stk. Fermacellplatte, 15 mm, 125 x 300 cm
- 2 Stk. Fermacellplatte, 18 mm, 125 x 300 cm
- Verschraubung Rahmenwerk (noch zu klären)
- geeignete Nagelschrauben gem. ETA-03/0050
- Stroh-Einblasdämmung
- Fenster, 113 x 140 cm



Zeichnung 3A: Alternativer Hauptversuch Rahmenwerk mit Fenster (Steher mit Abmessungen BSH 4,5/32)

Konstruktionsaufbau:

- Wechselfalzschalung (Lärche bzw. Fichte), 22 mm
- Luftlattung, 30 mm
- Fassadenschutzbahn, UV-beständig, verklebbar
- Fermacellplatte, 18 mm
- Rahmenwerk 6/32 cm, dazwischen Stroh-Einblasdämmung
- Fermacell-Vapor-Platte, 15 mm
- Installationsebene mit Kreuzlattung 2 x 40 mm, dazwischen Nawaro-Dämmung mit 2 x 40 mm, Produkt noch offen
- Fermacellplatten, 2 x 12,5 mm

Gesamtstärke: 50,0 cm

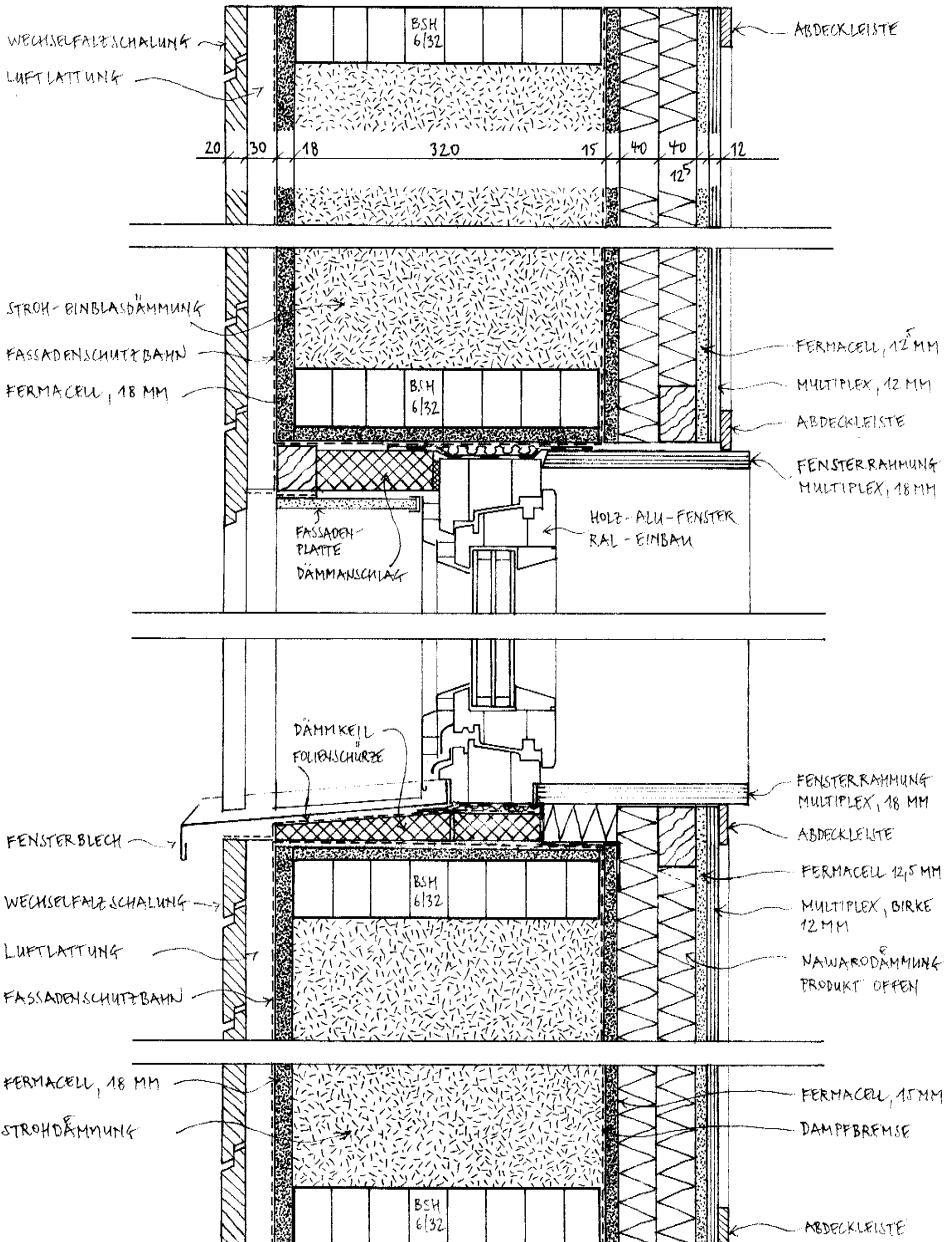
U-Wert: 0,144 W/m²K (Holzanteil i.M. 18 %)

Fenster

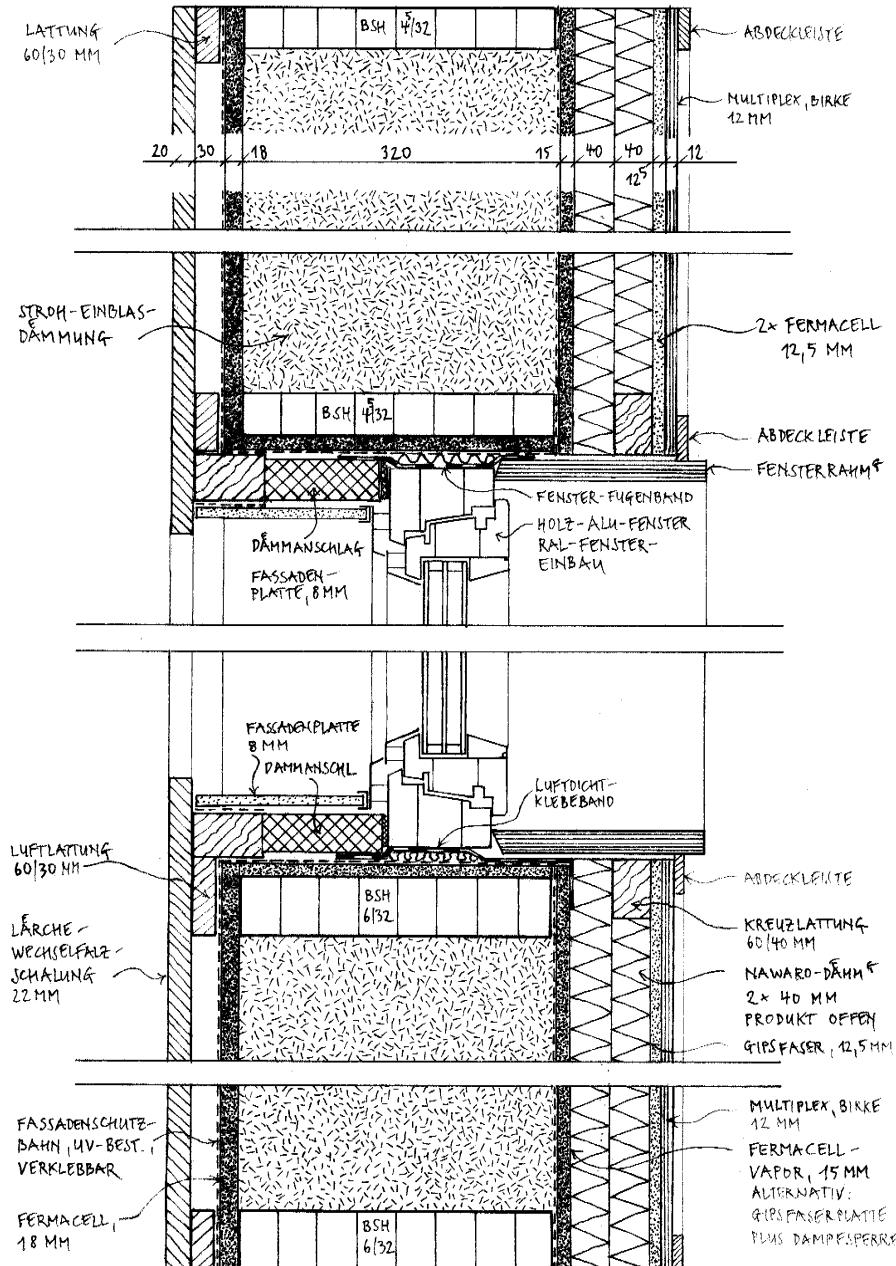
- Holz-Alufenster (passivhaustauglich) 113,0 x 140,0 cm
- $U_{W(\text{eingebaut})} < 0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$

Fensteranschlüsse:

- Luft- und schlagregendichter Anschluss mit Klebebändern oder alternativ mit geeigneten Fensterfugenbändern
- Hineinführen Fassadenschutzbahn und der Dampfbremse in die Fensterlaibung
- Ausbildung Dämmanschlag aus feuchteunempfindlicher, formstabilen Dämmstoff (z.B. Purenit bzw. Compacfoam)
- Abdichtung unter Fensterblech in Form einer wasserdicht ausgebildeten Folienschürze (15 cm über Blech)
- Einbau Fensterblech mit wasserdichten Innenecken oder mit seitlichen Aufschieblingen mit Rinnenfunktion nach außen
- Befestigung Fensterstock sichtbar und zugänglich
- Fensterfuge ausstopfen oder Ausführung mit PU-Schaum
- Fensterbekleidung innen mit Holzrahmen und Abdeckleiste



Zeichnung 4: Konstruktionsaufbau mit Fensteranschluss oben/unten



Materialeffizienter Holzrahmenbau

Im Sinne einer ökologischen Optimierung des Holzbau könnte man auf die Idee kommen, in jedem Gebäude eine möglichst große Holzmasse im Gebäude zu verbauen. Genau diese Denkart liegt vielen Holzbauförderungen zugrunde. Die Fördermittel werden dort je kg verbautem Holz ausgeschüttet und als Voraussetzung bestimmte Mindestwerte für die eingebaute Holzmasse je Quadratmeter Nutzfläche gefordert. Dabei werden folgende Punkte nicht ausreichend beachtet:

- Holz ist eine begrenzte Ressource. Sie sollte daher so eingesetzt werden, dass ein möglichst großer CO₂-Senkenefekt (Wälder gemeinsam mit Holzanwendungen) erreicht werden kann.
- Für den Erhalt der Biodiversität sind künftig mehr Waldflächen als derzeit unter Schutz zu stellen.
- Aufgrund des Klimawandels ist in letzter Zeit das Schadholzaufkommen erheblich angestiegen (negativer Einfluss auf Verfügbarkeit von heimischen Nadelholz für Sägewerke).
- Der bereits laufende Umbau der Monokulturen (Fichte- und Kiefernbestände) in klimaresiliente Mischwälder wird mittelfristig zu einer geringeren Verfügbarkeit von heimischen Nadelholz führen.
- Im Gegensatz dazu ist die Verfügbarkeit von Stroh für bauliche Zwecke hoch. Stroh stellt bislang eine kaum genutzte stoffliche Ressource mit großem Ausbaupotenzial dar.

Es gibt daher eine Reihe von Gründen, die Holzbauquote weiter zu steigern, dies jedoch mit einem sparsamen Umgang mit Holz zu kombinieren. Das führt weg von einer reinen Mengenbetrachtung („Wie kann man im einzelnen Gebäude eine möglichst große Kohlenstoffspeicherung erreichen?“) hin zu einer möglichst effizienten Umsetzung der hierfür notwendigen Material- und Energiedienstleistungen („Wie kann man mit den limitierten Ressourcen möglichst viel erreichen?“).

Zeichnung 5: Konstruktionsaufbau mit Fensteranschluss seitlich

Neufassung der ETA-03/0050

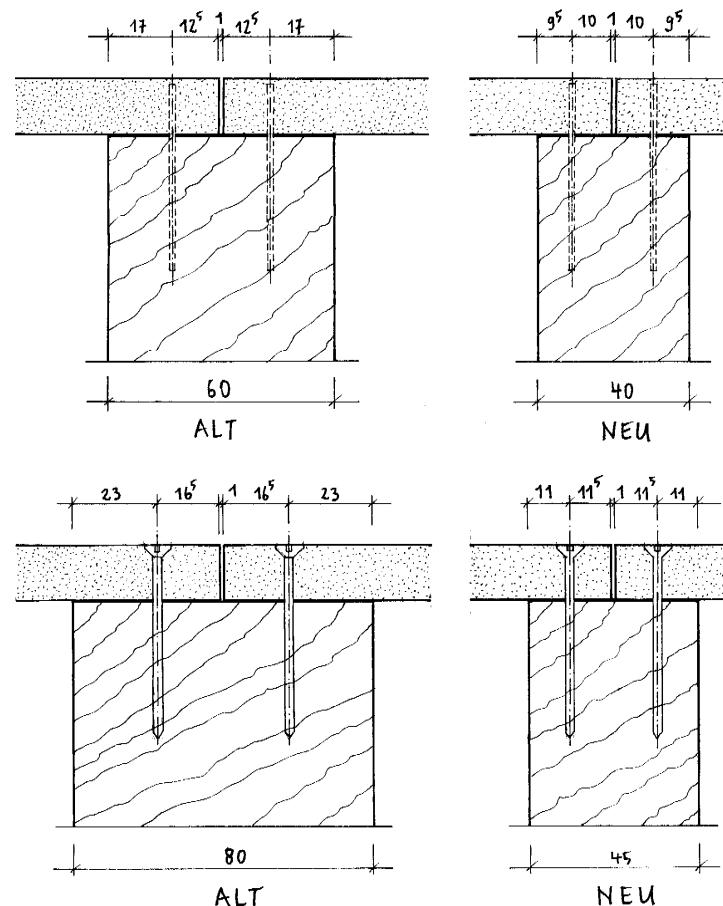
Für Fermacellplatten wurde nach umfangreichen Tests und Untersuchungen eine Neufassung der ETA-03/0050 veröffentlicht. Damit ist es möglich, die Randabstände für die Befestigungsmittel für Beplankungen und Bekleidungen deutlich zu reduzieren. Das führt zu geringeren Breiten der Holzrippen mit einer Reihe von Vorteilen für den künftigen Holzrahmenbau:

- Material- und Kosteneinsparungen
- Reduzierung der Wärmebrücken
- Steigerung der CO₂-Senkenwirkung wegen Ersatz Holz durch schnell nachwachsende Nawaro-Dämmung
- Verbesserung sommerlicher Wärmeschutz durch hohe Rohdichte Dämmung
- Eine hohe Rohdichte der Dämmung hat u.U. auch Vorteile für den Außenschallschutz (wäre nachzuweisen).

Ausbildung Holzrippen und Holzstegträger

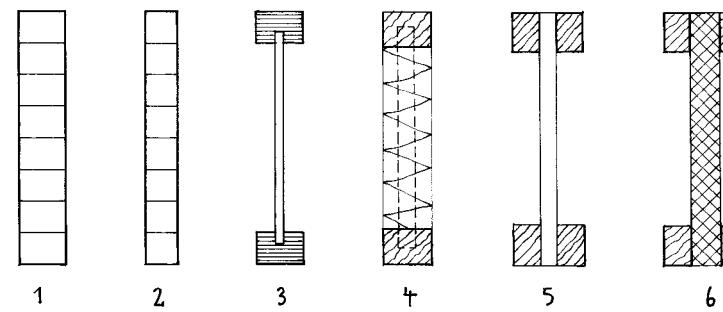
Die Ausbildung der Holzrippen oder Holzstegträger ist eine noch zu klärende Frage. Zum jetzigen Zeitpunkt wird wegen der notwendigen hohen wärmeschutztechnischen Qualität (U-Wert < 0,15 W/m²K) eine Ausbildung mit Vollholzquerschnitten ausgeschlossen. Diese sind kaum lieferbar und sind nicht ausreichend verwindungssicher. Möglich wären folgende Ausbildungen:

- Brettschichtholz 6/32 cm
- Brettschichtholz 45/320 mm (materialeffizientere Variante, wie bei Fertighäusern üblich und gem. ETA-03/0040 inzwischen möglich)
- Holzstegträger
- Dämmständer mit Buchendübeln
- U-Psi-Träger
- Holzstegträger mit Holzwolle-Leichtbauplatten (wegen Luftdurchlässigkeit günstig für Einbringen Stroh-Einblasdämmung)



Vergleich der Randabstände und der daraus folgenden minimalen Profilbreiten der Holzrippen der ETA-03/0050 Alt- und Neufassung.

Hier: Anwendung auf Klammerverbindungen, mit: B = 1,5 mm.



Vergleich der Randabstände und der daraus folgenden minimalen Profilbreiten der Holzrippen der ETA-03/0050 Alt- und Neufassung.

Hier: Anwendung auf Verbindungen mit (Nagel-)Schrauben mit B = 2,1 mm.

Verschiedene Ausbildungen von Holzrippen und Stegträgern.

- 1 Brettschichtholz 60/320 mm
- 2 Brettschichtholz 45/320 mm
- 3 Holzstegträger
- 4 Dämmträger mit Buchenstäben
- 5 U-Psi-Träger
- 6 Stegträger mit HWL-Platte

Leicht lösbare Verbindung mit klassischen Schrauben

Im Holzbau kann bezüglich dem zirkulären Bauen und speziellen Aspekt der Lösbarkeit von Verbindungen ein grundsätzlicher Unterschied gemacht werden:

- Bisher wurden vor allem lösbare Holz-Holz-Verbindungen entwickelt, die im Holzmassivbau oder für Befestigungen zwischen unterschiedlichen Holzquerschnitten zum Einsatz kommen sollen.
- Den Holz-Platte-Befestigungen wurde hingegen wenig Aufmerksamkeit geschenkt.

Im Holzrahmenbau sind Plattenbefestigungen mit Klammern heute Standard. Der Zeitaufwand ist gering. Mit Gipsfaserplatten lassen sich unter Anwendung der ETA-02/0050 in Verbindung mit der DIN EN 1995-1-1 extrem schlanke Holzquerschnitte umsetzen. Das ist ein wichtiger Beitrag zu holzsparenden Konstruktionen. Aus der Perspektive des zirkulären Bauens sind Klammerverbindungen jedoch ungünstig. Die Trennung von Platte und Rahmenwerk ist zerstörungsfrei nicht möglich, was eine Wiederverwendung stark einschränkt.

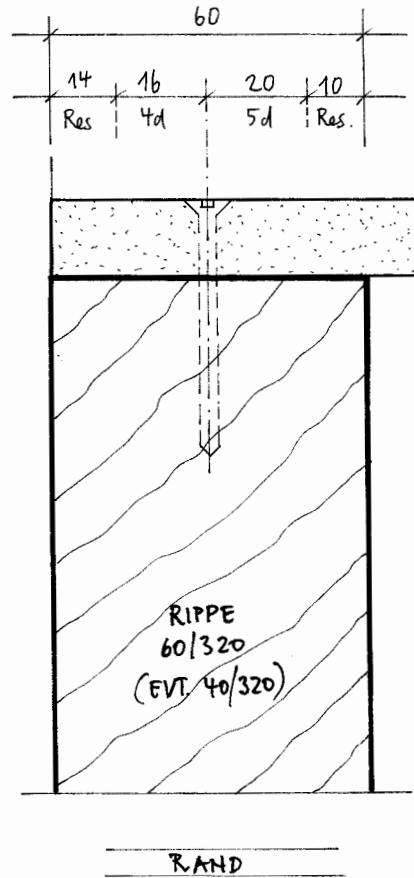
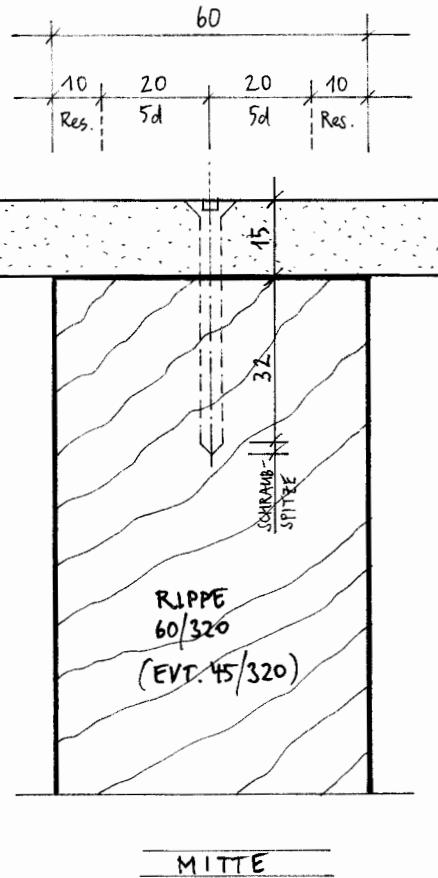
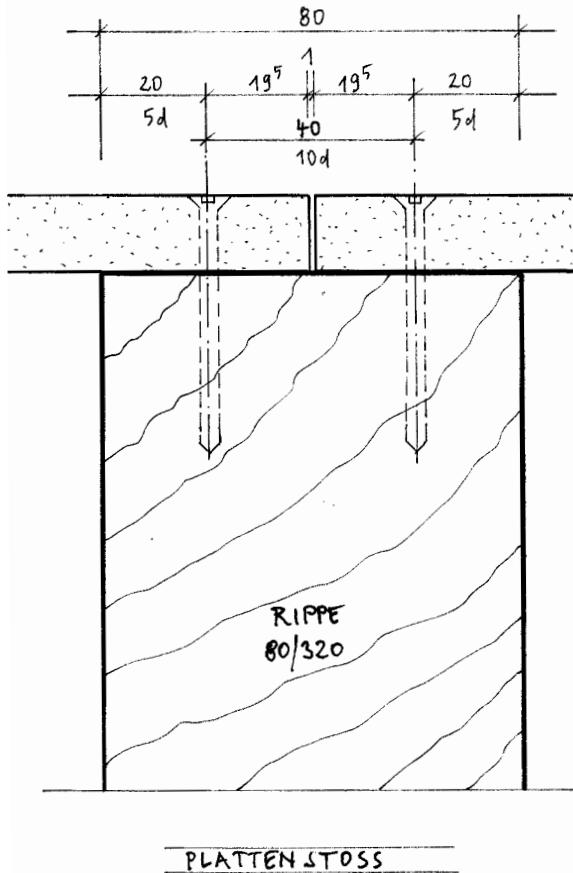
Nagelschrauben werden im Holzbau vor allem für eine zeitsparende und/oder automatisierte Befestigung von Holzbehängen (Lattungen / Schalungen) eingesetzt. Sie weisen nagelähnliche Querschnitte ($d = 2,5 - 5,0$ mm), rillenartige Gewinde und im Vergleich zu konventionellen Schrauben kleine Köpfe auf. Der Vorteil von Nagelschrauben ist, dass sie schnell und präzise mit Hilfe von Gasdrucknagelgeräten eingebracht werden können. Dies kann händisch oder automatisiert mit Hilfe von Nagelbrücken erfolgen. Das Herausschrauben von Nagelschrauben ist prinzipiell möglich. Bei den ersten Versuchen mit Gipsfaserplatten waren jedoch bei ca. 10 - 20 % der Nagelschrauben Probleme zu beobachten, die zu erheblichen Zeitverzögerungen führen. Ferner wurde festgestellt, dass eine Ausführung in Edelstahl zu stärkeren Verformungen bis hin zum Kopfabriß führt, die bei einer verzinkten Ausführung nicht auftraten.

Konventionelle Schrauben werden im vorgefertigten Holzrahmenbau zum Befestigung von Bekleidungen nicht mehr eingesetzt. Der Zeitaufwand gegenüber dem Klammern ist sehr viel größer. Im Trockenbau werden jedoch üblicherweise Schnellbauschrauben verwendet, die in Verbindung mit Magazinschrauben ein wirtschaftliches Arbeiten ermöglichen. Bei einer automatisierten Vorfertigung mit Multifunktionsbrücken sind Schraubaggregate verfügbar, die mittels Schlauchzuführung die Verarbeitung einer Vielfalt von Schraubarten und Schraubendimensionen zulassen. Auch hier ist der Zeitaufwand gegenüber dem Klammern deutlich erhöht. Im Gegenzug gelingt das Herausschrauben deutlich zuverlässiger, was am Ende einen zirkulären Holzrahmenbau möglich macht, bei dem alle Einzelkomponenten weiter- oder wiederverwendbar sind.

Bei den derzeit vorhandenen Verbindungsmitteln lassen sich bestimmte Gegenläufigkeiten bei den Vor- und Nachteilen zwischen wirtschaftlicher Vorfertigung und spätere Zerlegbarkeit feststellen:

- Je einfacher lösbar eine Verbindung ist, desto zeitaufwändiger und teurer ist das Einbringen.
- Je einfacher lösbar eine Verbindung ist, desto größer ihr nomineller Querschnitt und damit die erforderlichen Randabstände. Holzsparende Holzrahmenwerke sind derzeit vor allem mit nicht oder schwer lösbarren Verbindungen möglich.

Der Rückgriff auf konventionelle Schrauben ist insofern eher eine „Notlösung“ und lässt erkennen, dass hier ein Entwicklungsbedarf speziell für Platte-Holz-Verbindungen existiert.



Klärung der Randabstände und der Eindringtiefe für Schrauben gemäß DIN EN 1995-1-1 und der aktuellen ETA-03/0050. Konkrete Anwendung auf Schnellbauschrauben bzw. verzinkte Holzschrauben (mit: B = 3,9 x 50 mm bzw. 4,0 x 50 mm) für eine Fermacellplatte mit einer Stärke von 15 mm.

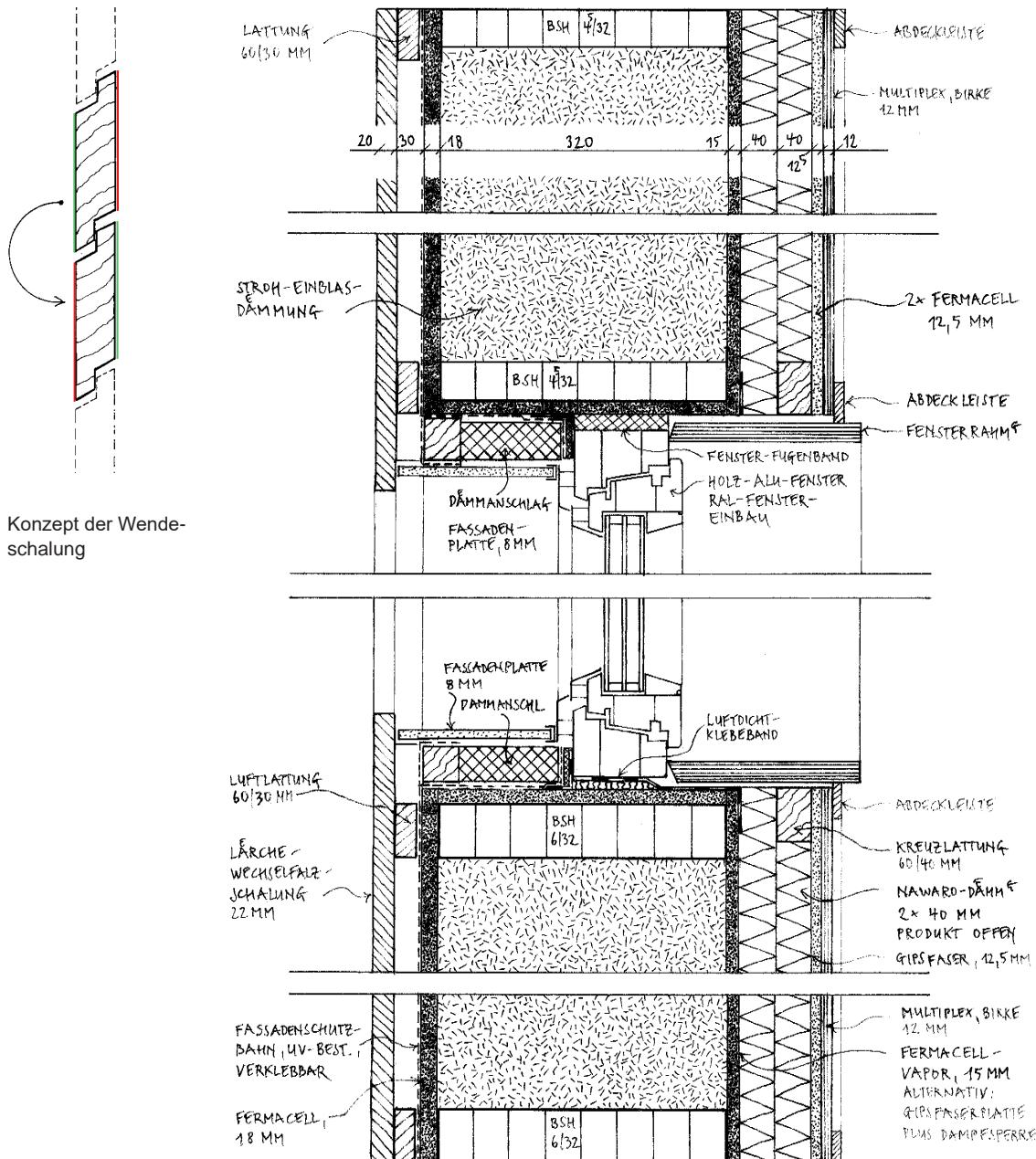
Darstellung von drei grundlegenden Situationen:

- 1) Plattenstoß
- 2) Mittelrippe mit durchlaufender Bekleidungsplatte
- 3) Randrippe

Folgende Punkte sind besonders zu beachten:

Beim Plattenstoß beträgt der seitliche Schraubenabstand mindestens 10 d rechtwinklig zur Faserrichtung.

Die minimale Eindringtiefe der Schrauben im Holzquerschnitt ist mit 8d festgelegt, gerechnet ohne die Schraubspitze.



Konzept der Wendeschalung

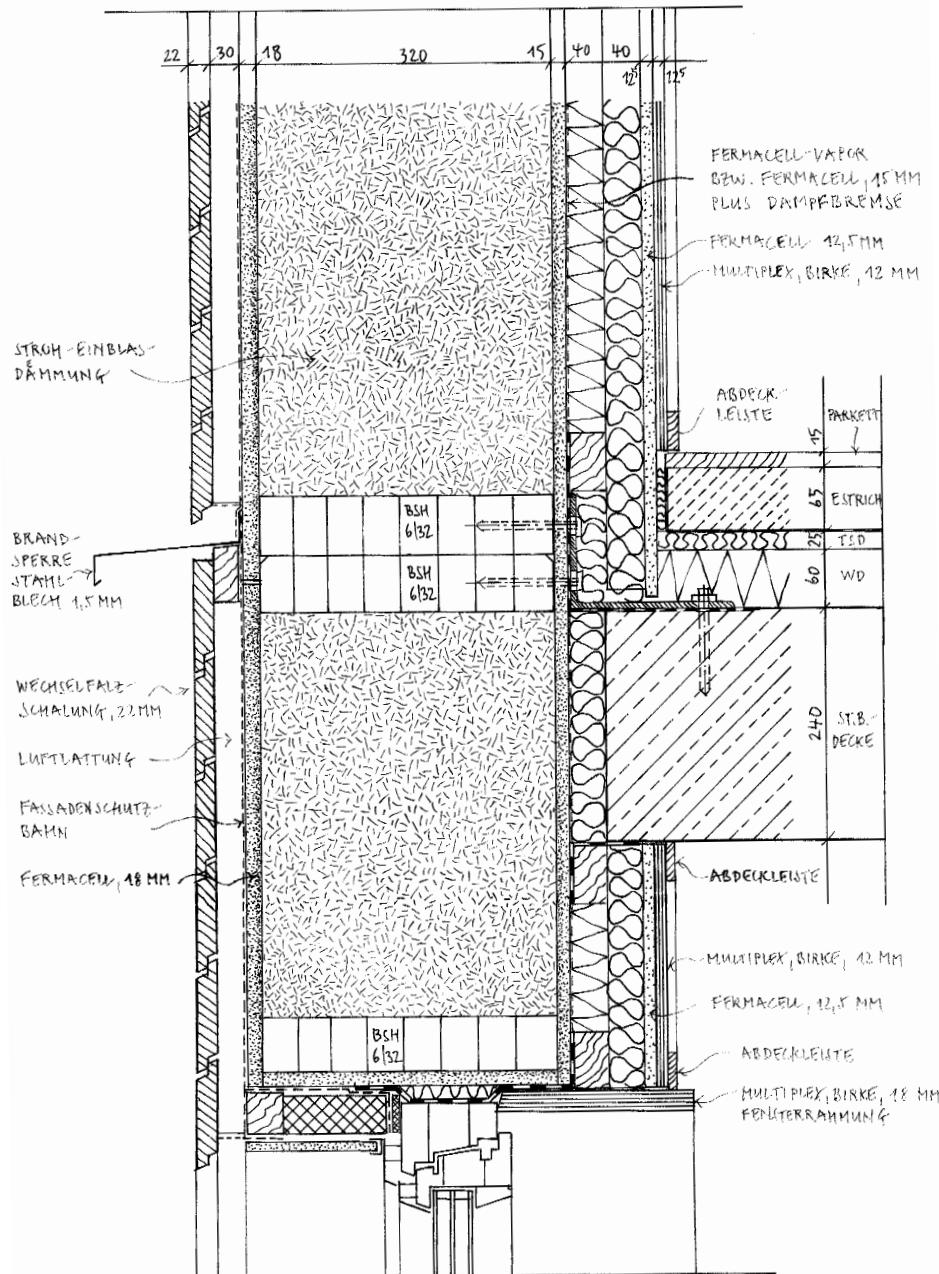
Ausbildung Installationsebene

Auch in der Installationsebene sollen möglichst viele Nawaro-Baustoffe zum Einsatz kommen. Zudem sollten die Einzelkomponenten weitgehend wiederverwendbar sein. Problem bei den üblichen Installationsebenen sind die inkl. der Schrauben verschachtelten Trockenbaubekleidungen. Am Ende der Nutzungsdauer lassen sich diese nicht zerstörungsfrei abnehmen.

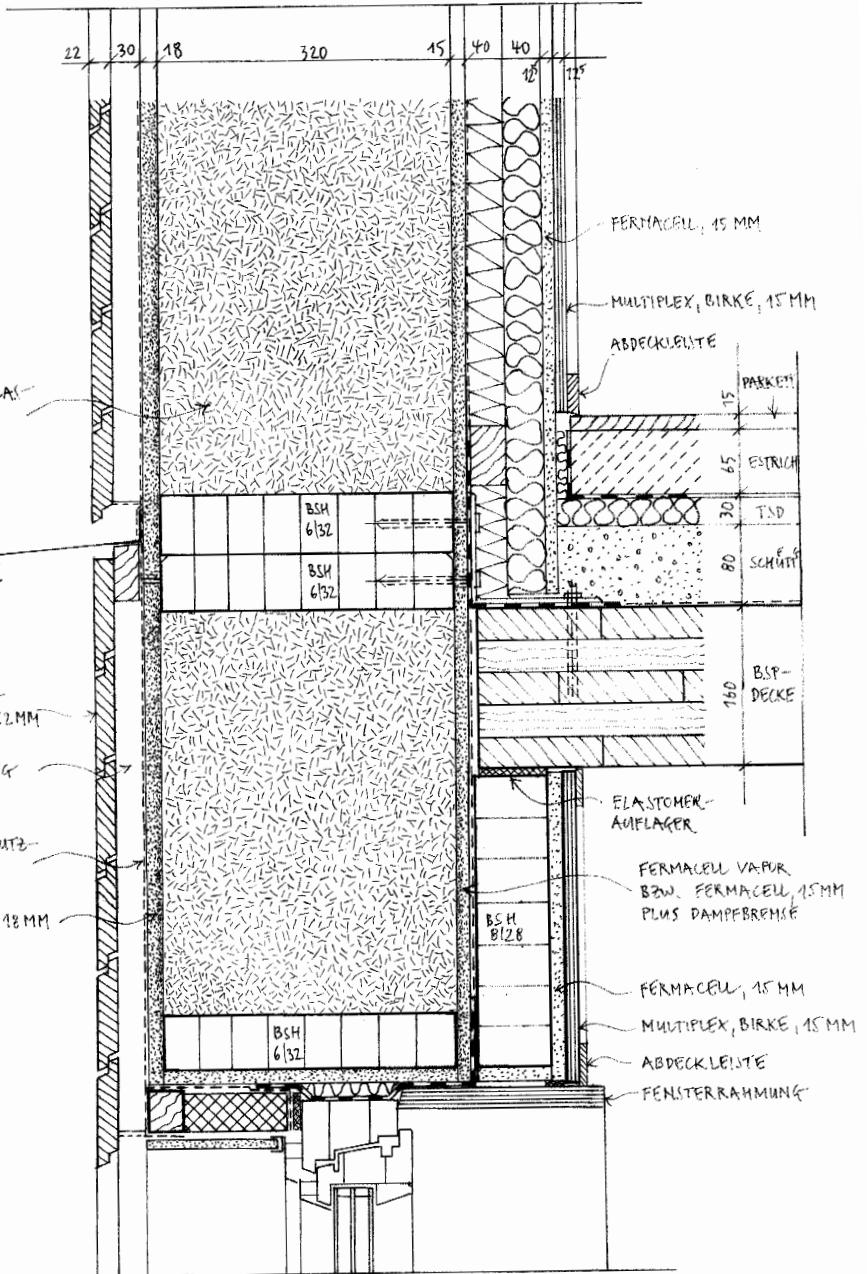
Vorgeschlagen wird eine Kreuzlattung (2 x 40/60 mm) mit Dämmung (z.B. aus Jute-Hanf-Matten) und eine Innenbekleidung bestehend aus einer Fermacellplatte 12,5 mm plus einer lackierten Birke-Multiplexplatte 15 mm. Letztere wird mit Deckleisten sichtbar auf die o.g. Lattung geschraubt. Die Fenster erhalten eine leicht vorstehende Fensterrahmung aus Birke-Multiplexplatten mit 18 mm Stärke. Die Fuge zur Innenbekleidung wird ebenfalls mit sichtbar verschraubten Deckleisten abgedeckt. Die Deckleisten dienen zugleich als oberer Anschluss an die Decke und als Fußbodenleiste. Angestrebgt wird ein wertiges Erscheinungsbild, das klar kenntlich macht, wie die Innenbekleidung hergestellt und befestigt ist, um den Ansatz des zirkulären Bauens auch innen nachvollziehbar und erfahrbar zu machen.

Wechselfalzschalung als sog. „Wendeschalung“

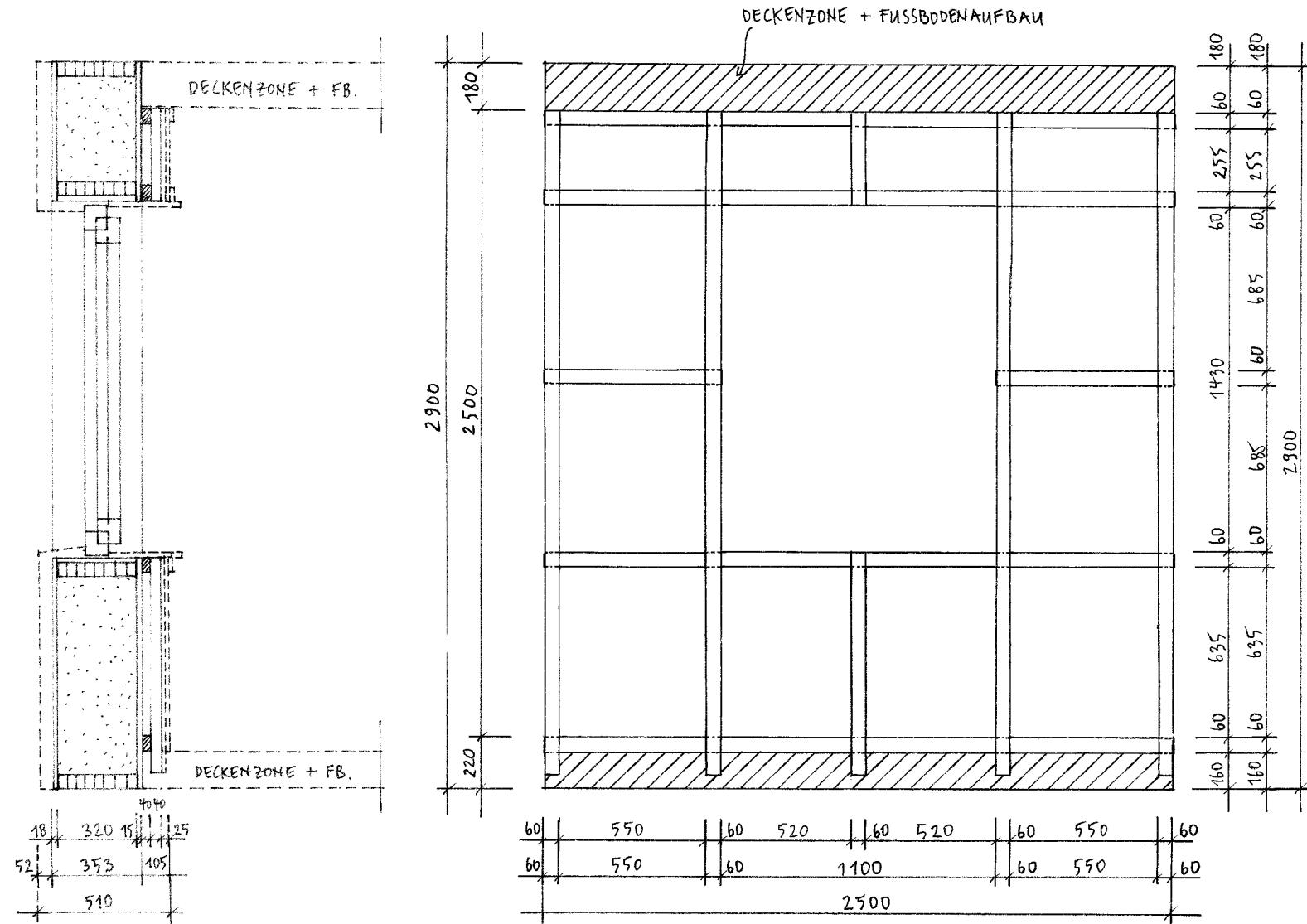
Der Holzbehang wird als horizontale Schalung in Form einer Wechselfalzschalung auf einer vertikalen Holzlattung ausgeführt. Die Wechselfalzschalung erhält eine punktsymmetrische Form. Damit kann die Schalung am Ende der Nutzungsdauer gewendet und, soweit der Verwitterungszustand das zulässt, ein zweites Mal verlegt werden. Vorteil der horizontalen Schalung ist ferner, dass an den Stellen, die einer starken Verwitterung ausgesetzt sind, die Bretter einfach getauscht werden können, was u.U. bereits während der Nutzungsdauer notwendig werden kann (z.B. im Sockelbereich).



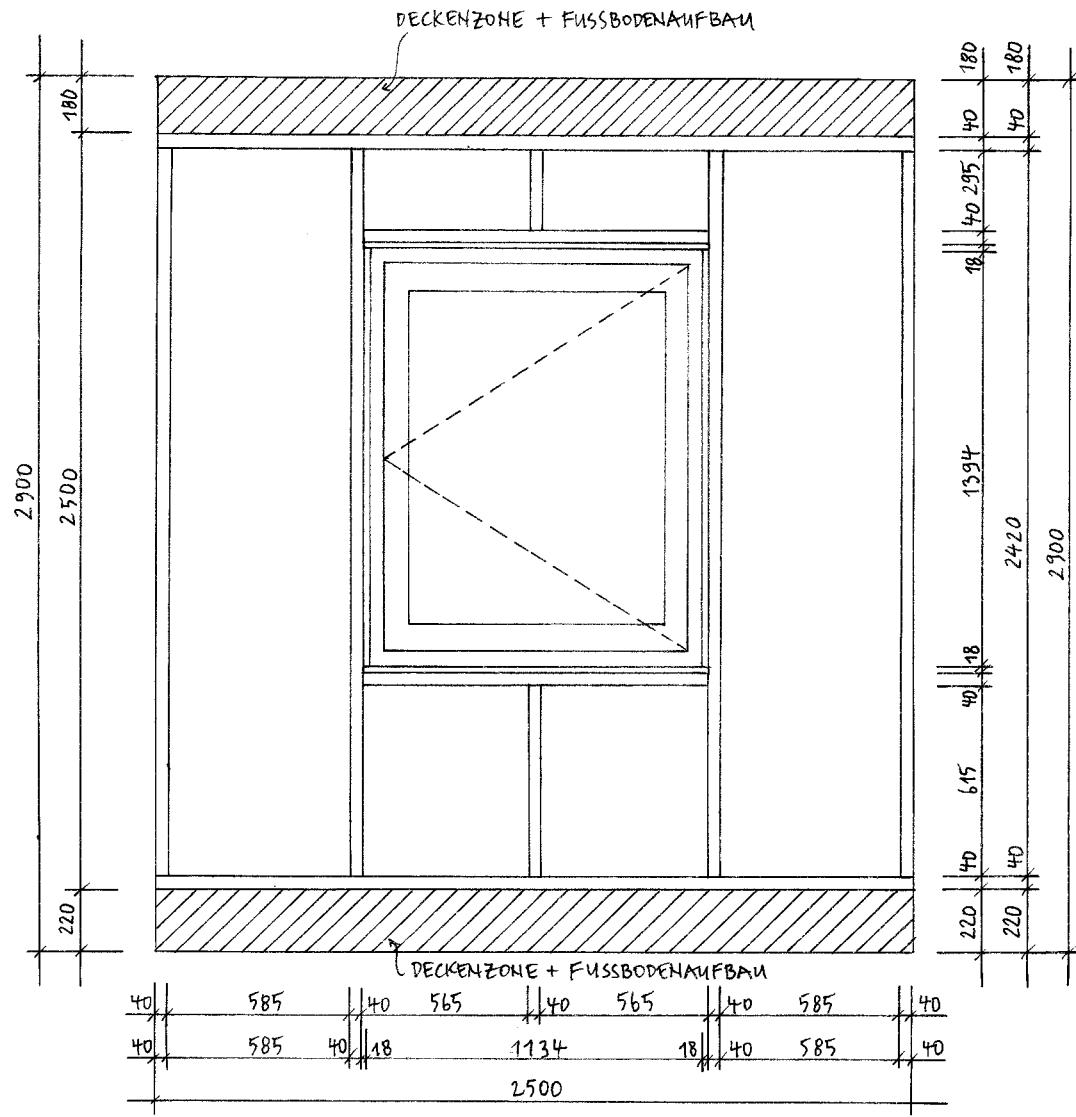
Zeichnung 7: Fenster- und Deckenanschluss an Stahlbetondecke (Hybridbau)



Zeichnung 8: Fenster- und Deckenanschluss an BSP-Decke (GK 1-3) 23



Zeichnung 9: Kreuzlattung für Installationsebene



Zeichnung 10: Innenansicht Bekleidung - Fensteranschluss (Multiplexplatten mit Deckleisten)

Weiterverwendung Kernelement (Umbau nicht-tragende in tragende Außenwand für Gebäudeklassen 1 - 3)

Bei einem ein gut funktionierenden und gewarteten Schutzkonzept können die Kernelemente eine Lebensdauer aufweisen, die über den Lebenszyklus eines Gebäudes hinausgeht. Daher ist der kontrollierte Rückbau und die anschließende Weiterverwendung der Kernelemente für ein neues Gebäude durchaus eine interessante Option.

Hierbei stellen sich jedoch eine Reihe von Fragen, die am Ende auch die Konzeption, Abmessungen und Ausführung der Kernelemente für den „Erstbau“ betreffen:

- Eine Weiterverwendung der Kernelemente macht nur dann Sinn, wenn sie ohne größere Veränderungen ihrer Abmessungen und Öffnungen in die Planung des „Zweitbaus“ übernommen werden können. Eine besondere Rolle spielt hierbei die Elementenhöhe und somit eine durchgängige Geschosshöhe (gewählt: 290 cm).

- Für eine größere Flexibilität ist es hilfreich, wenn speziell die Brüstungsbereiche als eigenständige Elemente gefertigt werden, um sie später weglassen oder gegen andere Brüstungselemente tauschen zu können. Dies hat eine Typisierung der Fensterformate gemäß einem noch zu definierenden Höhenraster und den Achsbreiten des Holzrahmenbaus zur Folge.
- Ferner ist es sinnvoll, Überlegungen zum Wechsel von einer nicht-tragenden zu einer tragenden Fassade anzustellen. Hier wird der Vorschlag gemacht, dafür eine tragende Installationsebene auszubilden. Diese könnte aus einem im Sturzbereich angeordnetem Auflagerbalken (z.B. BSH 8/32) in Verbindung mit den Stehern verschraubten Stielen (z.B. KVH 8/8) bestehen. Eine Anwendung erscheint derzeit nur für die Gebäudeklassen 1-3 möglich (siehe Zeichnung 11).



Wiederverwendung von Kernelementen bei gleichzeitigem Wechsel von einer nicht-tragenden zu einer tragenden Außenwand. Als Deckenauflager wird ein Auflagerbalken oberhalb des Surzbereiches befestigt und mit einer tragenden Installationsebene ergänzt. Diese Art der Weiternutzung ist aus Brandschutzgründen nur für Gebäudeklasse 1-3 geeignet.

Weiterverwendung Kernelement („Felge - Reifen - System“)

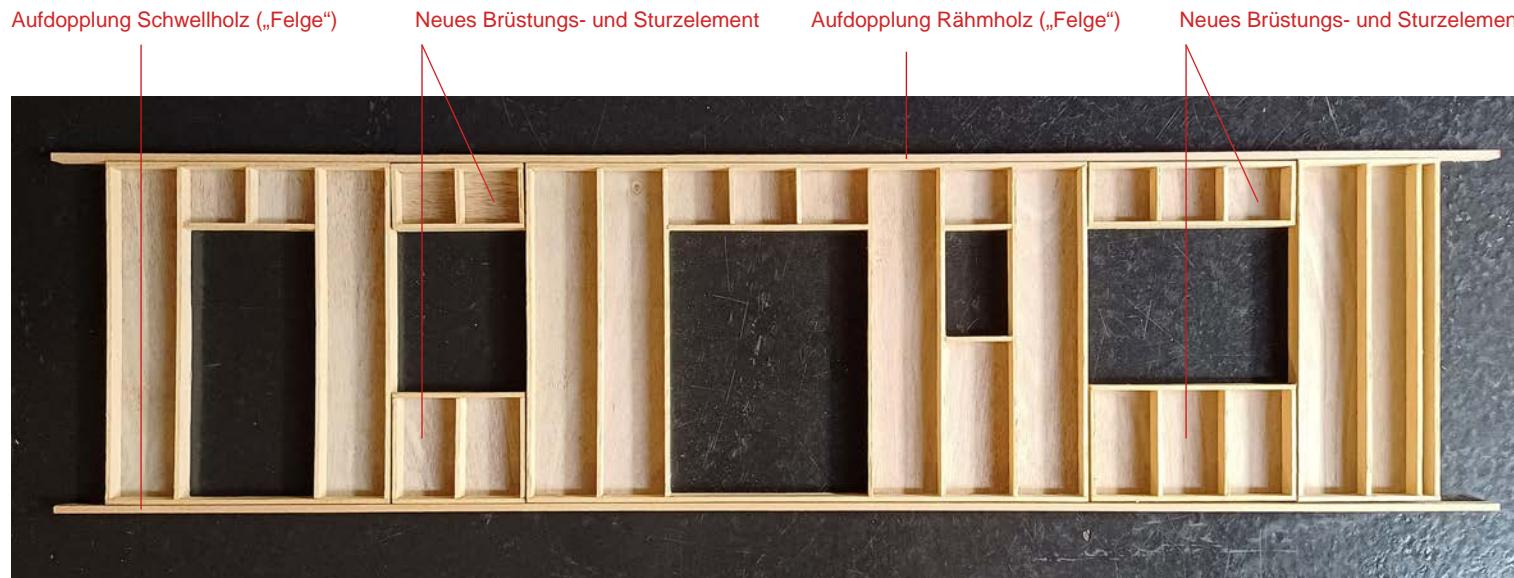
Ein weiterer Konstruktionsansatz für die Weiterverwendung der Kernelemente besteht im sog. „Felge-Reifen-System“. Hierbei werden die Kernelemente des „Erstbaus“ mit Hilfe eines zusätzlichen Schwell- und Rähmholz zu neuen Holzrahmenelementen zusammengefügt. Dieses System hat den Vorzug sehr flexibel zu sein, weil hierbei eine Mischung von Alt- und Neuelementen auf besonders einfache Art und Weise möglich ist.

Folgende Aspekte sind dabei besonders zu beachten:

- Durch den Einsatz eines zusätzlichen Schwell- und Rähmholzes vergrößert sich die Geschosshöhe um deren Abmessungen, z.B. $290 + 6 + 6 = 302$ cm.
- Die vertikale Verbindung der Rahmenwerke ist sehr einfach mit Hilfe von Plattenstreifen zu bewerkstelligen. Sofern die horizontalen Elementstöße des Altbau ebenfalls

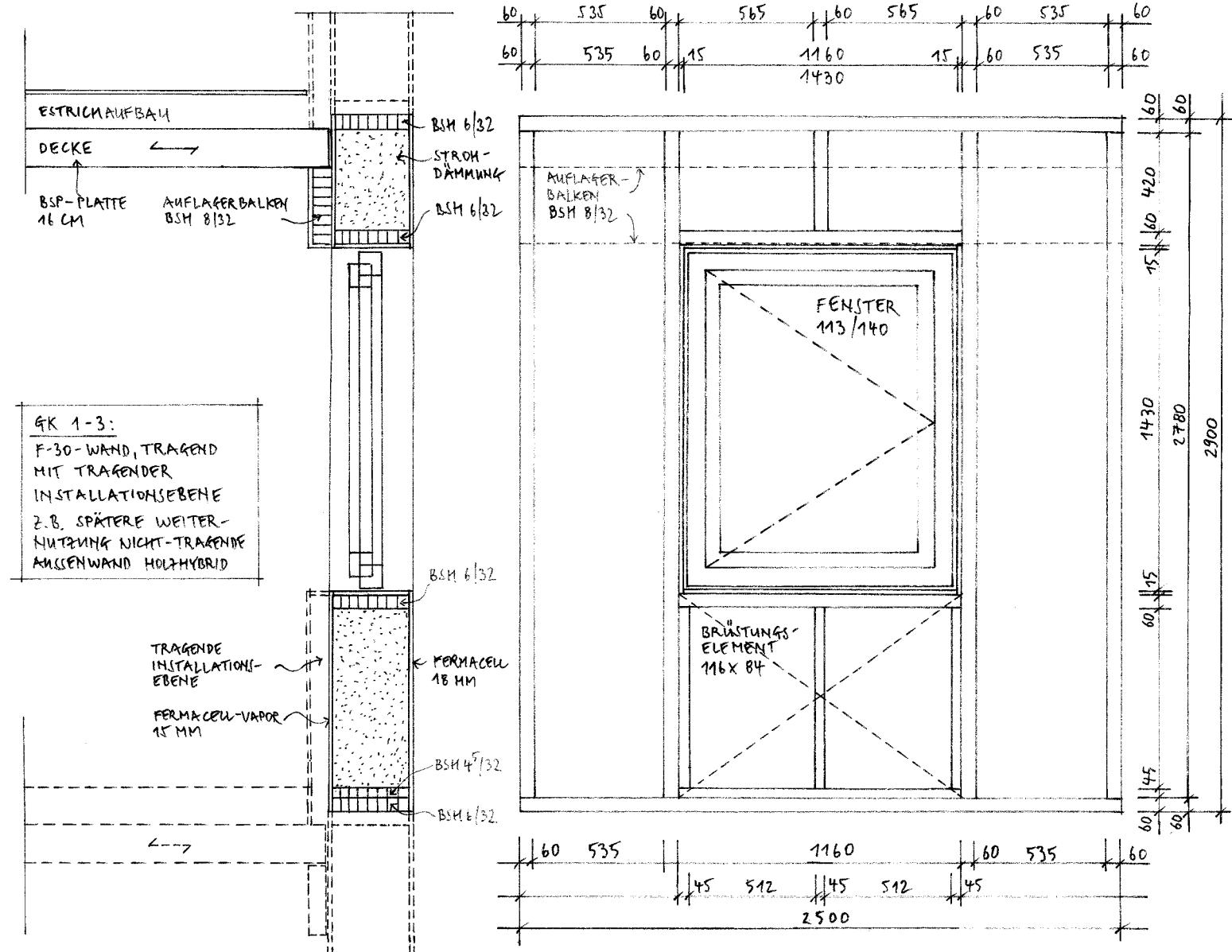
mit Plattenstreifen ausgeführt waren, kann man dort analog vorgehen. Voraussetzung ist allerdings, dass dann wenigstens die Plattenstreifen mit leicht lösbarer Verbindungen ausgeführt waren (keine Klammern).

- Ergänzungen von neuen Öffnungen sind besonders einfach durch neue Brüstungs- und Sturzelemente möglich, die zwischen die Altelemente gespannt und in das neue Schwell- bzw. Rähmholz befestigt werden. Genaue Überlegungen erfordern hier die seitlichen Befestigungen, vor allem dann, wenn bereits im „Erstbau“ separate Brüstungselemente vorgesehen werden. Dieser Punkt ist auch für das Hauptexperiment von Bedeutung.
- Auch hier ist es möglich durch die Integration eines neuen Deckenauflagers über eine tragende Installationsebene den Wechsel von einer nicht-tragenden zu einer tragenden Außenwand zu realisieren (siehe Zeichnung 12).

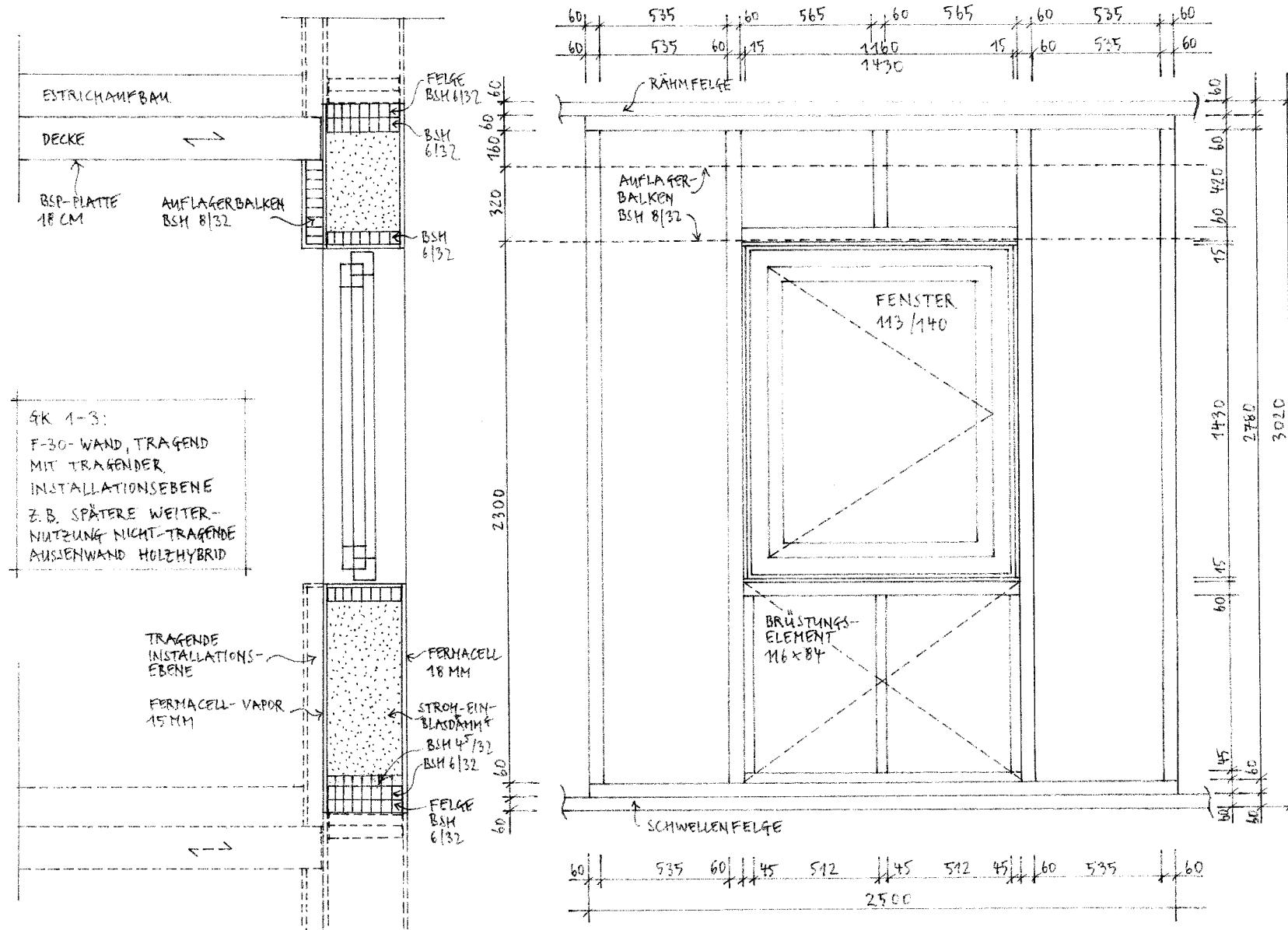


Wiederverwendung von Kernelementen gemäß dem sog. „Felge-Reifen-System“. Die ausgebauten und freigelegten Holzrahmenelemente werden gemäß den Anforderungen des nächsten Projektes neu angeordnet und über ein zusätzliches Schwellen- und Rähmholz zu neuen Elementeinheiten verbunden. Zur Erzielung einer möglichst großen Flexibilität können neue Sturz- und Brüstungselemente eingefügt werden. Als Konsequenz der nun gedoppelten Schwell- und Rähmholz wird die Geschosshöhe um deren Stärke vergrößert. Der Holzanteil der Elemente steigt entsprechend an.

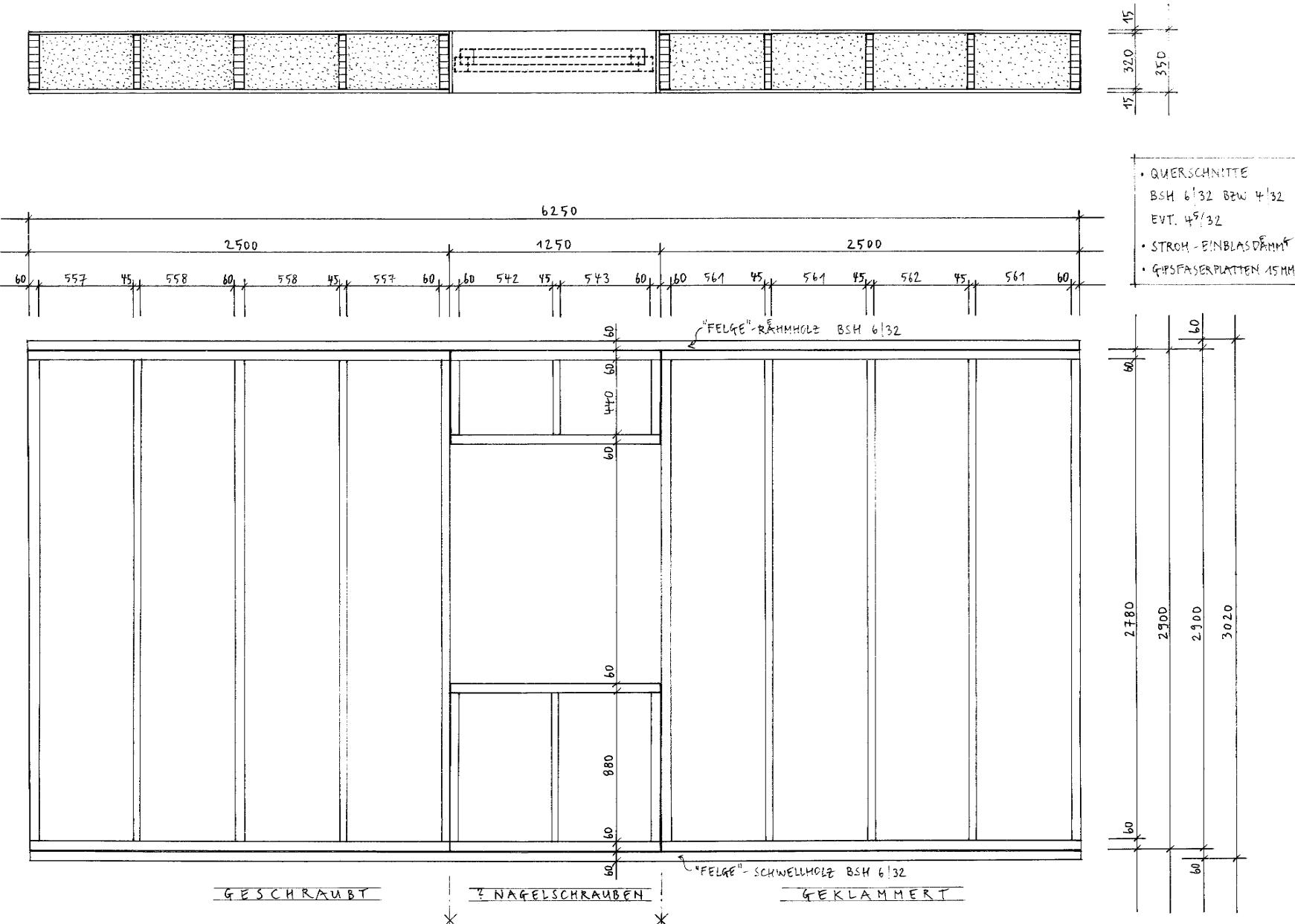
Zeichnungen



Zeichnung 11: Vorschlag Weiterverwendung Kernelement mit tragender Installationsebene



Zeichnung 12: Vorschlag Weiterverwendung Kernelement gemäß dem sog. „Felge-Reifen-System“



Zeichnung 13: Versuch zu einer möglichst weitgehenden Vorfertigung von zerlegbaren bzw. wiederverwendbaren Holzrahmen mit Hilfe von Multifunktionsbrücken

Versuche zur Vorfertigung und Wiederverwendung

In einem weiteren Experiment soll untersucht werden, wie die Ergebnisse des Hauptexperiments in die Vorfertigung von Holzrahmenelementen übertragen werden können.

In der Nachbesprechung wurde deutlich, dass die Umsetzung eines klimapositiven zirkulären Holzrahmenbaus in der Vorfertigung wahrscheinlich technisch und kostenseitig einfacher umsetzbar ist, als bei einer handwerklichen Ausführung. Das betrifft z.B. den Einsatz von Schraub- bzw. Gasdrucknagel-Automaten für die Holz-Platte-Verbindungen und von Einblasplatten für die Strohdämmung. Als weitere Themen können die Wiederverwendung der Kernelemente und das automatisierte Zerlegen am Ende der Nutzung genannt werden.

In der Zeichnung 13 wird ein Vorschlag gemacht, wie sich anhand eines zusammengesetzten Elements folgende Fragestellungen näher untersuchen lassen:

- Durch die ETA-03/0050 können die Randabstände der Verbindungsmittel deutlich reduziert werden. Gerade bei einer Vorfertigung können dadurch Vorteile durch eine holzsparende Bauweise entstehen. Zu prüfen ist jedoch, ob die Maßhaltigkeit der Holzrippen (insbesondere deren Verwindungsverhalten) eine zuverlässige Befestigung der Bekleidungen erlaubt.
- Einsatz von Schraubautomaten anstelle der üblicherweise verwendeten Klammeraggregate und Ermittlung des zusätzlichen Zeit- und Kostenaufwandes.
- Neue Versuche mit Nagelschrauben in Verbindung mit Nagelbrücken. Evt. sind größer dimensionierte Nagelschrauben als in den Vorversuchen erfolgversprechend. Dies gilt insbesondere für das spätere Herausschrauben beim Zerlegen bzw. Rückbau.
- Es wird vorgeschlagen aus Vergleichsgründen ein Holzrahmenelement mit Klammerverbindungen auszuführen.

- Einbringen der Strohdämmung mit einer Einblasplatte. Hierzu haben bereits mehrere erfolgreiche Versuche mit den beiden Firmen Isostroh und x-floc stattgefunden. Im Zusammenhang der Vorfertigung ist von Interesse, wie die Einblasdämmung am besten in den Fertigungsprozess der Holzrahmenelemente integriert werden kann (Lagerhaltung, Staubentwicklung, Unterbrechung Elementfertigung).
- Im Rahmen des Versuchs könnte in einem zweiten Schritt nach der Fertigung der Elemente der Vorgang der Wiederverwendung der Kernelemente mit dem „Felge-Reifen-Prinzip“ durchgespielt werden. Dabei wäre insbesondere auzuprobieren, wie die Neukombination von Alt- und Neu- bzw. Ergänzungselementen hinsichtlich Befestigungen und der geforderten dicht gefügten Brandschutzbekleidungen ausgeführt werden kann.
- Zu diskutieren wäre ferner, wie der Rückbau und ein anschließendes automatisiertes Zerlegen erfolgen könnte. In der Nachbesprechung waren sich alle Beteiligten einig, dass dies nicht auf der Rückbau-Baustelle sondern an einem geschützten Ort, z.B. durch darauf spezialisierten Firmen in deren Werkhallen ausgeführt werden sollte.



Multifunktionsbrücke (Fa. Weinmann)



Erfolgreicher Versuch mit Einbringen von Strohdämmung mit einer Einblasplatte (Fa. X-FLOC)

Nachfolgende (theoretische) Untersuchungen

Erst im Anschluss an die praktischen Versuche sollen weiterführende (theoretische) Untersuchungen erfolgen. Grund hierfür ist, dass zunächst eine praktisch gut umsetzbare Ausführungsvariante entwickelt werden soll, die als Bezugspunkt für weitere Fragestellungen dient. Das schließt nicht aus, dass als Folge der weiterführenden Betrachtungen Änderungen, weitere Optimierungen oder Ausführungsvarianten nahegelegt werden, die letztlich Einfluss auf das vorgesehene Endresultat einer standardisierten Konstruktion mit möglichst großem Anwendungsspektrum haben.

Schutzkonzepte im Holzbau

Angesichts der langen Nutzungsdauer von Gebäuden (bei Wohnbauten im Mittel 120 Jahre) sollten auch die Holz-Hauptkonstruktionen - in diesem Fall das Kernelement - eine entsprechende Nutzungsdauer erreichen. Als Konzept wird hierbei eine zweistufiges System gemäß dem Prinzip „Gürtel und Hosenträger“ vorgeschlagen. Dies besteht aus dem Fassadenbehang („äußere Haut“, z.B. Holzschalung) und der Be- bzw. Hinterlüftung mit Fassadenschutzbahn („innere Haut“).

Näher untersucht werden soll, wie die Anschlüsse, z.B. an Fenster, Brandsperren, Kabeldurchdringungen, Elementstöße zuverlässig ausgeführt werden können. Besonderes Interesse haben hierbei die Elementstöße und Brandsperren bei einer weitgehenden Vorfertigung, weil hier die bauseitige Zugänglichkeit oftmals nicht gegeben ist bzw. besondere Überlegungen erfordert. Ein anderer Punkt sind notwendige Abdichtungen im Bereich von Balkonen und Loggien oder im Sockelbereich. Schließlich sollen auch Dachanschlüsse und die zugehörigen Anschlüsse an Fassaden oder sonstige aufgehende Bauteile genauer abgeklärt werden.

Bilanzierung der fossilen und biogenen Emissionen

Die bislang üblichen statischen Ökobilanzen weisen besondere Schwächen im Hinblick auf die Bilanzierung der fossilen und biogenen Emissionen auf (vgl. Vallentin 2024, S. 37):

- Material- und energiebedingte Emissionen werden über den gesamten Lebenszyklus (z.B. 50 Jahre) hinweg mit gleichbleibenden Emissionsfaktoren bestimmt. Die bereits laufende und die künftige Dekarbonisierung der Wirtschaft und Energiesysteme wird nicht berücksichtigt.
- Die biogenen Emissionen von Holz und sonstigen nachwachsenden Rohstoffen werden unter der Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung kalkuliert. Damit werden energetische und sonstige kurzzeitige Nutzungen mit langlebigen Nutzungen (z.B. Baukonstruktionen im Holzbau) gleichgestellt. Ferner wird kein Unterschied zwischen schnell und langsam nachwachsender Biomasse gemacht.

In den Untersuchungen zur Bilanzierung werden für das Holzrahmenelement unterschiedliche Berechnungsmethoden angewendet und miteinander verglichen:

- Ökobilanzen, z.B. gemäß (BNB 2019).
- Bilanzierung mit Hilfe des Senkensaldos für Holz (Fehrenbach et al. 2022) sowie mittleren Emissionsfaktoren für die Energiesysteme während des Betrachtungszeitraums.
- Bilanzierung der biogenen Emissionen mit dem GWP(bio)-Index (Guest et al. 2012) und szenariengestützten Emissionsfaktoren für die Energiebereitstellung.

Ziel ist eine Bewertung der Richtungssicherheit, Aussagekraft und Anwendungsfreundlichkeit der verschiedenen Bilanzmethoden um daraus einen Vorschlag für eine angemessene Bilanzierung klimapositiver Bauteile abzuleiten.

Betrachtung verschiedener End-of-Use-Prozesse

Im Sinne eines kreislaufgerechten Bauens soll untersucht werden, welche Rückbauoptionen nach heutigem Wissenstand möglich sind und wie darauf aufbauend eine einfache Klassifizierung vorgenommen werden kann.

Für den Rückbau sind zunächst die Art und Weise der Demontage und der bauseitigen Zwischenlagerung (Begutachtung, Dokumentation, Vorbereitung Transport) zu beschreiben.

Falls eine direkte Wiederverwendung der Kernelemente oder Baukomponenten nicht in Frage kommt (z.B. wegen Verlust Zulassungen, Beschädigungen bei Rückbau, Reduzierung der statischen Eigenschaften) ist die Rückführung in den Herstellungsprozess die nächstbeste Option. Dies ist bei den begrenzten Ressourcen Holz und Gips von besonderer Bedeutung.

In Form von Einblasdämmung ist es grundsätzlich möglich, Stroh direkt wiederzuverwenden. Es kann aber auch in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden (z.B. Einarbeitung in Äcker). Eine weitere Alternative wäre die Verwendung zur Herstellung von Biokohle (Pyrolyse). Eine thermische Nutzung sollte in jedem Falle vermieden werden, weil mit hohen und prinzipiell vermeidbaren Emissionen verbunden.

In Tabelle 2 wird zunächst ein Vorschlag für eine einfache Klassifizierung der einzelnen Baukomponenten nach dem Rückbau gemacht. In der Untersuchung sollen jedoch für jede Baukomponente die möglichen Nachnutzungsprozesse detailliert beschrieben und bewertet werden.

Eine weitere Idee ist, den möglichst zerstörungsfreien Rückbau und die möglichen Nachnutzungsprozesse in einem „Bauteilpass“ zusammenzufassen oder als „Stempel“ direkt am Bauteil zu platzieren. Besonderer Wert ist dabei auf eine einfache Sprache und möglichst viele bildliche Darstellungen zu legen.

Vorschlag für eine Klassifizierung von Rückbau - Prozessen	
Bezeichnung	Klassifizierung
a1	wiederverwendbar
a2	eingeschränkt wiederverwendbar
a3	nicht wiederverwendbar
b1	nahezu vollständig recyclingfähig (> 75 %)*
b2	eingeschränkt recyclingfähig*
c	deponiefähig
d	thermische Nutzung möglich
e	Gefahrenstoff, Sonderentsorgung

* mit Angabe der maximalen Rückführungsquote

Tabelle 2:
Vorschlag für eine einfache Klassifizierung für Rückbauprozessen für Bauteile bzw. Baukomponenten. Mehrfachnennungen sind möglich.

Weitere Themen

Als weitere Untersuchungsthemen kommen in Frage:

- Bauphysikalische Nachweise zu Brand-, Schall- und Feuchteschutz sowie zum sommerlichen Wärmeschutz.
- Optimierung Ressourceneinsatz und Arbeitsprozesse (Material- und Arbeitsaufwand).
- Untersuchungen zur Verfügbarkeit der Hauptmaterialien.
- Tests zu statischer Belastbarkeit und Erdbebensicherheit (Vergleich Erstelement - wiederaufgebautes Element).
- Vergleichende Brandversuche (Erstelement - wiederaufgebautes Element).
- Versuche zu den Schutzkonzepten, z.B. im Bewitterungsstand.
- Untersuchung zu den Markchancen und den Voraussetzungen bzw. Bedingungen für eine breitere Markteinführung.

Projektbeteiligte (derzeitiger Stand)

Gipsfaserplatten

James Hardie (Fermacell)
Ansprechpartner: Jens Morscheid / Marten Sievert
T. +49 (0)151/14800284 // +49 (0) 171 / 5592 451
jens.morscheid@jameshardie.com // marten.sievert@....

Holzbau

Huber & Sohn
Ansprechpartner: Martin Nachtwey
T. + 49 (0) 8071 / 919 - 0
info@huber-sohn.de

Einblasverfahren

CLIMASONIC
Ansprechpartner: Hannes Buchwinkler
T. +43 6272/21909 // +43 676 / 733 1103
hannes.buchwinkler@climasonic.com

Strohdämmung

ISO-STROH
Ansprechpartner: Leopold Kasseckert
T. +43 664 / 8814 6614 // +43 664 / 4002 798
office@iso-stroh.net

Befestigungsmittel

ITW Haubold
Ansprechpartner: Jens Hödel
T. +49 (0) 175 / 9311 254
j.hoedel@itw-befestigungssysteme.de

Generalunternehmer

dad Gruppe
Ansprechpartner: Bledar Dodaj
T. +49 (0) 173 / 697 9415
bdodaj@dad-gruppe.de

Abdichtkomponenten / Fassadenschutzbahn

pro clima
Ansprechpartner: Guido Menzel // Markus Kilian
T. +49 (0) 175 4139 381 // +49 (0) 160 / 5411 994
guido.menzel@proclima.com // markus.kilian@proclima.com

Recycling-EPS-Dämmung (Dämmanschlag Fenster)

Compacfoam
Ansprechpartner: Florian Nowy
T. +49 (0) 676 / 841 371 13
florian.nowy@comacfoam.com

Wissenschaftliche Begleitung

Energieinstitut Vorarlberg
Ansprechpartner: Martin Ploss
T. +43 5572 / 3120 285
martin.ploss@energieinstitut.at

Wissenschaftliche Begleitung (Eventuelle spätere Versuche zu Statik und Erdbebensicherheit)

RWTH Aachen
Ansprechpartner: Lukas Rauber
T. +49 (0) 241 / 80 - 24797
rauber@stb.rwth-aachen.de

Tragwerksplaner

lieb obermüller + partner
Dr. Markus Lieb
T. +49 (0) 089 / 235 559 -23
lieb@lop.de

Sachverständiger (Abdichtungsfragen, Schutzkonzepte)

Norbert Hirschbeck
T. +49 (0) 176 / 1024 7876
norbert.hirschbeck@bharchitekten.de

Vorläufiger Finanzplan

Holzrahmenelement ohne Fenster	2.500 Euro
Holzrahmenelement mit Fenster	7.500 Euro
Zerlegen HR-Elemente	1.000 Euro
Wiederaufbau HR-Elemente	1.000 Euro
Energieinstitut Vorarlberg	2.500 Euro
Sonstiges	1.500 Euro
Reserve / Unvorhergesehenes	1.000 Euro

Summe: **15.000 Euro**

Materialanteil (geschätzt):	ca. 5000 Euro
Arbeitskosten / Vorbereitung (geschätzt)	ca. 10.000 Euro

Soweit möglich, sollen die Kosten als Eigenleistung der Projektbeteiligten erbracht werden.

Nutzungsrechte

Jeder Projektbeteiligte darf und soll die Ergebnisse der Untersuchungen frei verbreiten und auch für eigene Zwecke nutzen (z.B. Internetseite, Faltblatt, Broschüre, ect.). Das umfasst auch alle während der Untersuchung entstehenden Berechnungen, Nachweise, Zeichnungen, Fotos und Filme.

Eine Nennung der Quellen unter Bezugnahme auf das Forschungsprojekt „Klimapositiver zirkulärer Holzrahmenbau“ ist jedoch wünschenswert. Insgesamt wird ein „Open-Source“-Prinzip angewendet, d.h. die Ergebnisse werden für alle Interessierte zur Verfügung gestellt und sollen der Verbreitung des Konstruktionsansatzes dienen.

Quellen / Literatur

- (BBSR 2020) BBSR (Hrgs.): Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland; Online-Publikation Nr. 17/2020, www.bbsr.bund.de
- (BNB 2019) Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (Hrgs.): „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“, Berlin, 2019
- (ETA-03/0050) Deutsches Institut für Bautechnik (Hrgs.): „Europäische Technische Bewertung ETA-03/0050 - Gipsfaserplatten für die Beplankung und Bekleidung von Bauteilen“, Stand: 14. Dezember 2023.
- (Fehrenbach et al. 2022) Fehrenbach, Horst; u.a.: „The missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Stocks in Greenhouse Balances of Wood Use“; *Forests* 2022, 13, 365. (2022).
- (Feist/Krick 2024) Feist, Wolfgang; Krick, Benjamin: Energie und CO₂ im Lebenszyklus: Ausgangspunkt“. In: Protokollband kostengünstige Passivhäuser Nr. 60; S. 1 - 24; Hrgs: Passivhaus-Institut Damstadt, 2024.
- (Fermacell 2021) Deutsches Institut für Bautechnik (Hrgs.): „Bauart zur Errichtung einer tragenden Wand in Holztafelbauweise der Feuerwiderstandsklasse F30-B nach DIN 4102-2“, Stand: 01.07.2021.
- (Guest et al. 2012) Guest, Geoffrey u.a.: „Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in Anthroposphere and Used for Bioenergy at End of Life“, *Journal of Industrial Ecology*, Vol 17, Number 1, 20-30 (2012).
- (Pittau et al. 2018) Pittau, Francesco u.a: „Fast Growing Bio-Based Materials as an Opportunity for Storing Carbon in Exterior Walls“; Internetveröffentlichung unter DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.006
- (Vallentin 2024) Vallentin, Rainer: „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?“, Online-Veröffentlichung unter: www.vraie.de
- (Schellnhuber 2021) Schellnhuber, Hans-Joachim: „Bauhaus der Erde. Nachhaltige Nutzung von Holz im Bausektor“, In: Klaus Wiegand (Hrgs.): „3 Grad mehr“, Oekom-Verlag, München, 2022, S. 169 - 208.