Professur Holz- und Mauerwerksbau der
Bauhaus-Universität Weimar

Untersuchungen an ressourcenschonenden, innovativen hybriden Wandbauteilen aus Holz mit mineralischer Deckschicht für mehrgeschossige Passivhäuser

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 29244-25 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Karl Rautenstrauch &
Dipl.-Ing. Alexander Stief, Dipl.-Ing. Christian Dorn

Februar 2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 1
Abbildungsverzeichnis 2
Tabellenverzeichnis 3
Zusammenfassung 4
1. Einleitung 5
2. Darstellung der Arbeitspakete - Ergebnisse 8
2.1 Materialauswahl 8
2.1.1 Einleitung 8
2.1.2 Holz 8
2.1.3 Mineralische Deckschicht 9
2.1.4 Hybrides Verbundelement 10
2.2 Versuche an Hybridbauteilen 14
2.2.1 Einleitung 14
2.2.2 Probekörper 14
2.2.3 Wand-Schubversuche 18
2.3 Montagefugen und Detailpunkte 21
2.3.1 Einleitung 21
2.3.2 Kellerdeckenanschluss 21
2.3.3 Geschossdeckenanschluss 21
2.3.4 Traufanschluss 22
2.4 Bauphysik und Simulation 23
2.5 Nachhaltigkeit der eingesetzten Baustoffe 29
2.5.1 Einleitung 29
2.5.2 Recycling 29
2.5.3 Wiederverwendung der Hybriden Elemente 31
2.5.4 Vergleich mit herkömmlichen Baustoffen 36
3. Fazit und Ausblick 39
4. Literaturverzeichnis 40
5. Anhang 42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Holz-Grundelement mit S-förmigen Fräsungen 10
Abbildung 2: Auftragsversuche Putztechnik auf unterschiedlichen Oberflächen..... 11
Abbildung 3: Mehrlagiger Schichtaufbau: Grund- und Deckputz..... 11
Abbildung 4: Integrierte Wandflächenheizung 12
Abbildung 5: Lehmputz–Zwischenlage mit aufgerauter Oberfläche für guten Haftverbund .. 12
Abbildung 6: Holzschalung als eine Möglichkeit der Außenwandbekleidung 13
Abbildung 7: Systemaufbau des Hybridbauteils 13
Abbildung 8: Wandelement Massiv-Holz-Mauer® 15
Abbildung 9: Wandelement Brettstapelbauweise 15
Abbildung 10: PK01: Grundelement, sägerau 16
Abbildung 11: PK01: Verbundelement im Versuchsstand 16
Abbildung 12: PK02 Grundelement mit S-Fräsung und aufgesprühtem Haftvermittler 17
Abbildung 13: PK02 Verbundelement mit seitlichen Wandanschlüssen 17
Abbildung 14: PK03 Grundelement + Grundputz 17
Abbildung 15: PK03 Aufbringen des Oberputzes 17
Abbildung 16: Lastregime Grundversuche 5/10/20/30 mm 18
Abbildung 17: Lastregime zyklische Versuche 18
Abbildung 18: Kraft-Verformungsverlauf der Grundelemente..... 19
Abbildung 19: Vergleich der Steifigkeiten der Grundelemente 19
Abbildung 20: Kraft-Verformungsverläufe PK01 und PK03 19
Abbildung 21: Vergleich der Steifigkeiten PK01 und PK03 19
Abbildung 22: Kraft-Verformung PK03–Verbundelement 20
Abbildung 23: Steifigkeiten PK03 - Verbundelement..... 20
Abbildung 24: exemplarischer Wandquerschnitt für Passivhaus-Berechnung 23
Abbildung 25: Glaser-Diagramm des Wandquerschnittes..... 24
Abbildung 26: Temperaturverlauf des Wandquerschnittes..... 25
Abbildung 27: Gangkurven des Innenraumklimas 26
Abbildung 28: Klimakurven des Außenklimas der Stadt Essen..... 26
Abbildung 29: Diskretisierung des Wandquerschnittes 27
Abbildung 30: Temperaturverlauf für 34. (links) und 244. Tag (rechts) 27
Abbildung 31: Vergleich der Temperaturverläufe nach Delphin & Glaser 28
Abbildung 32: Trennung der Baustoffe nach Versuch 30
Abbildung 33: Detail direkte Verbundzone Deckschicht auf Holz..... 30
Abbildung 34: Altholzkategorien 31

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hybride Wand-Elemente mit Variation der Oberflächen und Deckschichten..... 15
Tabelle 2: U-Wert Berechnung für Passivhaus-Wandaufbau 23
Tabelle 3: Temperatur & Sättigungsdrücke des Wandquerschnittes..... 24
Tabelle 4: zugewiesene Materialien und deren Eigenschaften 25
Tabelle 5: Leistung und Kosten, Vergleich der Rezyklierungsmöglichkeiten 35
Tabelle 6: Leistung und Kosten, Zusammenfassung..... 38

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte vor allem im Bereich des Bauens mit der sogenannten „Massiv-Holzbauweise“ (CLT) eine in Bezug auf energetische und ökologische Gesichtspunkte konkurrenzfähige Ausbildung von derartigen Wandelementen entwickelt werden. Die wesentliche und innovative Abgrenzung zu marktüblichen Systemen begründet sich im hybriden Aufbau des Wandelementes. Neben den bekannten Vorteilen dieser Massivholzelemente, welche auch den Einsatz nicht so hochwertiger Holzqualitäten erlauben und damit auch eine breitere Ausschöpfung des Holzangebotes für eine sehr langfristige CO_2-Bindung im Hochbau ermöglichen ergeben sich damit im direkten Vergleich zu konventionellen Mauerwerks- oder Betonbauweisen erhebliche Energieeinsparungen sowie zusätzliche sich synergetisch akkumulierende bauphysikalische Qualitäten. Die unmittelbar im Verbund zum Holz hergestellte Putzschicht kann zusätzlich mit diesem in vielfältiger Weise interagieren und dazu beitragen, die bauphysikalische Gesamtwirkung dieses hybriden Wandaufbaues als Speicher- und Pufferzone für in situ auftretenden bauklimatischen Schwankungen der Temperatur oder Luftfeuchte wesentlich zu verbessern. Gleichzeitig wird ein baupraktisch einfach umzusetzendes und an Kundenwünschen flexibel auszurichtendes Oberflächenfinish mit optimalem Toleranzausgleich ermöglicht. Hierdurch ergeben sich deutliche ausführungstechnische sowie wirtschaftliche Vorteile gegenüber der bisher angewandten Beplankung der Innenoberflächen mittels GK-Platten.

Nach ersten Anpassungen des Holzelementes selbst, z. B. zur weiter erhöhten Dämmwirkung mittels der darin stehenden Luftschichten, erfolgten umfangreiche Untersuchungen und Testreihen zur Strukturierung der Holzoberfläche, damit der direkte Verbund respektive die Verzahnung mit der mineralischen Deckschicht optimiert wird. Damit einhergehend fand die Entwicklung und Abstimmung der Deckschichteigenschaften selbst statt. Dabei waren neben der Abbindedauer, der Deckschichtstärke und der Auftragstechnologie vor allem der Wasserbedarf und damit die gegenseitige Beeinflussung der Baustoffe untereinander bezüglich der teils konträr verlaufenden Quell- und Schwindprozesse elementar wichtig. Hierbei zeigten sich stark differierende Ergebnisse bei kleinformatigen Probekörpern im Verhältnis zu Bauteilen mit realitätsnahen baupraktischen Abmessungen. Es konnte eine mehrlagig aufzutragende Deckschicht eruiert werden, welche sich vor allem durch einen sehr geringen Energiebedarf bei der Herstellung, die optimale Beeinflussung des Wohnklimas sowie die signifikante Verbesserung des Brandschutzes auszeichnet. Die Steifigkeit solcher Wandscheiben wird wesentlich erhöht, was insbesondere zur Aussteifung mehrgeschossiger Hochbauten hervorzuheben ist. Weiterhin wurde eine alternative Ausbildung der mineralischen Deckschicht aus dem bekannten traditionellen und überaus ökologischen sowie wohngesunden Baustoff Lehm in diese Forschungen (zu Vergleichszwecken) mit einbezogen. Im Ergebnis können damit in der Baupraxis je nach Erfordernis diese beiden unterschiedlichen rein natürlichen Baustoffe, in vielfältiger Weise zur individuellen Gestaltung der Innenwandoberflächengüte kombiniert werden.

Im Forschungsprojekt fand eine enge Kooperation mit zwei Unternehmen aus der Wirtschaft statt. An dieser Stelle wird daher der Massiv-Holz-Mauer Entwicklungs GmbH aus Pfronten-Weißbach im Allgäu/ Bayern hinsichtlich der geleisteten Beiträge sowie die Unterstützung zur Anpassung der Holzbauwandelemente und weiterhin den maxit Baustoffwerken aus Krölpa/ Thüringen für ihr Engagement sowie das Einbringen ihrer langjährigen Erfahrungen auf dem Gebiet der mineralischen Baustoffe für Putze etc. respektive bei der Entwicklung, Abstimmung sowie Aufbringung der mineralischen Deckschichten ganz herzlich gedankt.

Das Forschungsvorhaben wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen Az 29244-25 gefördert.

1. Einleitung

Die energiepolitischen Vorgaben und Auflagen für weiter notwendige CO_2-Einsparungen im Baubereich bewirken immer höhere Anforderungen an die Gebäudehülle bezüglich der Wärmedämmung und der bauphysikalisch nötigen Diffusionsoffenheit. Diese hohen Anforderungen können Bauwerke am besten erfüllen, wenn sie durch eine ressourcenschonende Bauweise respektive innovative, energieeffiziente und nachhaltige Baustoffe und Konstruktionsmethoden errichtet werden. Daher gilt es, vor allem den konstruktiven Aufbau als auch deren Abfolge dahingehend zu optimieren, dass das synergetische Potential der beteiligten nachwachsenden und nachhaltig verfügbaren heimischen Baustoffe optimal genutzt wird. Vor diesem Hintergrund bestand die Zielstellung dieses Forschungsprojektes in der Bereitstellung technologischer und bauphysikalischer Grundlagen zum wirtschaftlichen Einsatz von hybriden Holzverbund-Wandbauteilen mit mineralischer Deckschicht für die Anwendung ein- sowie mehrgeschossiger Passivhäuser in Holzbauweise. Neben statisch-konstruktiven Gesichtspunkten sollte der Focus vor allem auf einem gesamtheitlich abgestimmten, ökologischen Konzept für hybride Wandbauteile gelegt werden. Die dabei zu erarbeitenden bauteilbezogenen Lösungsvorschläge sollten die heutigen sowie zukünftig weiter steigende Anforderungen an den Klimaschutz und ein wohngesundes Raumklima berücksichtigen und sich zudem durch einen möglichst einfach gestalteten, fehlertoleranten Wandaufbau auszeichnen. Die ebenfalls angestrebte, kostengünstige Herstellung derartiger Wandbauteile könnte u. a. auch in infrastrukturschwachen Gegenden die schnelle und unkomplizierte Errichtung hochwertiger mehrgeschossiger Gebäude ermöglichen. [Bay09], [CC07], [KVWLM10]

Durch die Anordnung einer raumseitigen Speicher- und Pufferzone, bestehend aus einer ca. 40 mm starken mineralischen Innenputzschicht, bei den hybriden Wandbauteilen können temporär immer anfallende Feuchteschwankungen sehr gut abgefangen und gedämpft werden. Weiterhin kann damit die in der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung geforderte Luft- und Winddichtheit der Gebäudehülle erfüllt werden. Durch den Einsatz der ausgewählten Materialien und deren besonders energiearmer Aufbereitung werden zudem wertvolle Primärenergie- Ressourcen geschont, da beispielsweise keine energie- und kostenintensiven Brenn- oder Aufbereitungsprozesse benötigt werden. Die daher im Hinblick auf eine Gesamtbilanz sehr hohe Energieeffizienz der Elemente begründet sich auch darauf, dass nach Ablauf der Nutzungsphase die Baustoffe einfach getrennt und vollständig recycelt werden können. Gerade im Vergleich zu üblichen massiven Wandkonstruktionen kann bei hybriden Holzverbundbauteilen mit einem sehr geringen Aufwand die weitgehend sortengetrennte Demontage mit anschließender stoffgerechter Eingliederung in Kreislaufprozesse (Recycling) erfolgen. Dabei können alle beteiligten Baustoffe ohne Probleme wiederverwendet werden, d. h. die Putzschicht lässt sich z. B. durch einfache Aufmahlung als mineralischer Baustoff wiederverwenden und das Holzmaterial kann ebenso weiterverwendet oder auch thermisch verwertet werden.
Mit der neuartigen Kombination eines direkten Verbundes von Holz und einer natürlichen mineralischen Deckschicht aus Kalk, Kalk-Gips, Lehm oder Anhydrit oder deren innovativer Kombination, wird somit ein sehr energieeffizientes hybrides Verbundbauteil erstellt, was sich durch hohe Nachhaltigkeit und einen überaus geringen Carbonfootprint auszeichnet. Neben dem geringen Energieverbrauch zur Herstellung, u. a. durch den Einsatz regionaler Baustoffe und damit verbundenen kurzen Transportwegen sowie der Möglichkeit der Vorfertigung sind sowohl der Transport zum Einsatzort, als auch die Montage selbst mit relativ geringem Einsatz von energieintensiver Technik möglich.

Auch das Betreiben von Gebäuden aus hybriden Bauelementen stellt eine wirtschaftliche Alternative dar, da der für ein gesundes Raumklima (Belüftung, Beheizung) notwendige energetische Aufwand minimiert wird und somit allgemein die Installation, der Betrieb, die Unterhaltung respektive Wartung sowie der finale Austausch notwendiger gerätetechnischer Einrichtungen im Aufwand stark reduziert oder gar partiell ganz entfallen und damit insgesamt sehr kostengünstig gestaltet werden kann.

Somit ist eine einfache und langlebige, aber auch sehr flexible, installations- und reparaturfreundliche Verbundbauweise möglich, wobei sich die hervorragenden Eigenschaften der eingesetzten Materialien ergänzen und auch erhöhte Qualitätsanforderungen, die der mehrgeschossige Wohn- und Bürobau in Passivhausbauweise z. B. in bauphysikalischer Hinsicht stellt, umsetzbar. Gerade die bei beiden Baustoffen immanent vorhandene Eigenschaft, das Raumklima in Bezug auf die Feuchtigkeit optimal zu regulieren und damit gleichfalls hinsichtlich der Allergen-, Pilz- und Bakterienbelastung für sehr geringe Raumluftkonzentrationen zu sorgen ermöglicht in Kombination mit einer baustoffspezifischen niedrigen Strahlungs- und Schadstoffbelastung auch einen positiven Beitrag zur Wohngesundheit und bewirkt damit insgesamt eine allen Anforderungen entsprechende umweltbezogene nachhaltige ökologische Gesamtbilanz.

Die Kombination der Werkstoffe Holz und mineralische Deckschicht ist nicht gänzlich neu, sondern wird bei Fachwerkbauten schon seit Jahrhunderten ausgeführt. Die Innovation besteht in dem direkten Verbund der Materialien und dem damit zusätzlichen Lastabtrag sowie der Erhöhung der Bauteilsteifigkeit in Folge der Deckschicht. Im Bereich der modernen Verbundkonstruktionen aus Holz und mineralischen Schichten ist vor allem die Decke als Konstruktionsbauteil zu benennen. Erste Anfänge als Holz-Eisen-Beton-Konstruktion erfolgten zu Beginn des 20. Jahrhunderts [Mül22]. Innerhalb des letzten Jahrzehnts wurden Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Rautenstrauch [RSSDJMS09], Lehmann [Leh04] sowie Kuhlmann et al. [KGS02] und Michelfelder [Mic06] sowie zum Langzeittragverhalten von Schänzlin [Schä03] durchgeführt. Die Arbeiten beschränkten sich im Wesentlichen aber auf Deckenelemente und es wurden zusätzlich zur Lastübertragung verschiedene Verbindungsmittel eingesetzt.
Nachdem Schmidt [Schm03] sich schon im Jahr 2003 mit dem Material Calciumsulfatestrich als Deckschichtmaterial für Holzbalkendecken befasste, fanden vor allem durch Rautenstrauch et al. [RSSDJMS09] im Jahr 2009 umfangreiche Untersuchungen statt. Als Neuerung wurden dabei nicht mehr ausschließlich nur Decken, sondern auch Wandelemente für die konstruktive Anwendung in die Forschung einbezogen. Dabei zeigten sich insbesondere auch die wesentlichen Vorteile gegenüber den bis dahin meist für Wandbauteile eingesetzten mineralischen Materialien wie z. B. Ziegel, Beton, Mörtel und Putz. Einerseits wird beispielsweise für das Bindemittel Zement im Beton der Tragschicht üblicher Massivwände eine erheblich größere Energiemenge zur Aufbereitung sowie meist auch eine zusätzliche Stahlbewehrung benötigt als bei einer Ausführung in Brettsperrholz, andererseits können bei der Verwendung einer zusätzlichen auf dem statisch-konstruktiven Holzelement angebrachten dünneren, inneren mineralischen Deckschicht (z. B. aus Lehm oder Calciumsulfatputz) deren positive bauphysikalischen Eigenschaften für eine optimale Puffer- und Speicherzone für den instationären, bauteil- sowie raumluftbedingten Wärme- und Feuchtigkeitstransport genutzt werden.
Kombinationen aus unterschiedlichen Massivholzschichten und mineralischen Deckschichten, wie z. B. Gipskartonplatten, werden bisher in Deutschland zwar im Ausbaubereich eingesetzt, sind jedoch hinsichtlich ihrer Potentiale sowie Ausgestaltungsmöglichkeiten bisher kaum erforscht. Somit fehlen bisher systematische Untersuchungen zur Nutzung der aus dem Zusammenwirken der unterschiedlichen Bauteilschichten resultierenden synergetischen Eigenschaften von hybriden Massivholzverbund-Wandelementen insbesondere auf der Basis der zunehmend in der Baupraxis für den Bau mehrgeschossiger „Passivhäuser“ in nachhaltiger Holzbauweise eingesetztem Brettsperrholz (z. B. MHM) oder Brettstapelelemente.

Um die dargestellten Zielstellungen zu erreichen, wurden die Aufgaben in einzelne Arbeitspakete untergliedert. So sollten nach ersten Überlegungen zum allgemeinen Elementaufbau und der Einbeziehung ökologisch-nachhaltiger Aspekte die jeweiligen Schichten hinsichtlich ihres Speicherpotentials für Feuchte und Wärme optimiert werden. Dazu fand eine sehr enge und gute Kooperation mit den einbezogenen Wirtschaftspartnern statt. Besonders zeitintensiv war die Herstellung eines optimalen Verbundes in der Kontaktzone Holz-mineralische Deckschicht, da hierbei sämtliche Interaktionen, vor allem die Feuchtetransportvorgänge in den einzelnen Elementlagen bei der Aufbringung und dem Abbindevorgang der Putzschicht, mitberücksichtigt werden mussten. Das ausgeprägte Quell- und Schwindverhalten von Holzbauteilen bereitete insofern Schwierigkeiten, da die Überprüfung an Probekörpern mit kleinformatigen Abmessungen erheblich differierende Ergebnisse zu großformatigen Probekörperabmessungen ergaben.
Die Ergebnisse wurden anschließend an Bauteilversuchen getestet, womit eindeutige Aussagen zum Trag- und Verformungsverhalten gewonnen werden konnten. Um dennoch den Versuchsaufwand in gewissen Grenzen zu halten, fanden begleitende Simulationen statt, welche weiterhin auch für einige bauphysikalische Aussagen herangezogen worden sind. Diese Ergebnisse sind bei Ausbildungsmöglichkeiten von Montagefugen und Detailpunkten ebenso eingegangen, wie grundsätzliche Überlegungen und Berechnungen zur Wiederverwendung bzw. dem Recycling von derartigen hybriden Wand-Verbundbauteilen.

2. Darstellung der Arbeitspakete - Ergebnisse

2.1 Materialauswahl

2.1.1 Einleitung

Einer der wichtigsten nachwachsenden Rohstoffe, vor allem bei der Betrachtung im Bauwesen, stellt der Baustoff Holz dar. Infolge begrenzter Ressourcen an fossilen Brennstoffen und dem damit stetig steigenden Rohölpreis, welcher sich direkt auf die Energiekosten auswirkt, werden regionale, nachhaltige, energetisch günstige und ökologisch wertvolle Baustoffe nötiger und wichtiger denn je. Aus diesen Gründen finden Massivholzbauweisen, aber auch die Entwicklung von hybriden Holzverbundkonstruktionen immer mehr Zuspruch und erlangen immer mehr Bedeutung im Ingenieurholzbau. Unter Einbeziehung der aktuellen Musterbauverordnung wird der Baustoff Holz auch für den mehrgeschossigen Wohn- und Verwaltungsbau interessant und bietet somit eine ökologische Alternative zu herkömmlichen Massivbauweisen. Allerdings bestehen für mehrgeschossige Holzbauten in üblicher Holzrahmenbauweise sehr komplexe Anforderungen in bauphysikalischer aber auch brandschutztechnischer Hinsicht, welche nur durch die intelligente Kombination und Abstimmung verschiedener Werkstoffe gelöst werden können. Eine sehr effiziente und nachhaltige Variante stellen dabei hybride Verbundbauteile aus Holz mit einer innenliegenden, stärker ausgebildeten mineralischen Putzschicht dar. Deshalb besteht das Ziel und die Herausforderung darin, die Vorteile und Vielfältigkeit der hybriden Holz– Verbund Bauweise für den mehrgeschossigen Wohn- und Gesellschaftsbau konstruktiv und vor allem wirtschaftlich nutzbar zu machen.

2.1.2 Holz

Das tragende Grundelement der hybriden Wandbauteile stellt der Baustoff Holz dar. Neben der Tatsache, dass es sich hierbei grundsätzlich um einen der ältesten Werk- und Baustoffe handelt, ergeben sich beim Einsatz von Holz erhebliche Vorteile. Unter Betrachtung von umweltpolitischen Belangen hebt sich dieser Baustoff durch seine außergewöhnliche Energieeffizienz, Nachhaltigkeit, Langlebigkeit und die rückstandslose Wiederverwendung respektive Weiternutzung erheblich von anderen Baustoffen für den Gebäudebau ab. Es wird zu seiner Aufbereitung nur ein Bruchteil der Energie benötigt, welche beispielsweise zur Herstellung von massiven Werkstoffen aufgewendet werden muss. Es handelt sich um einen meist regional vorhandenen, nachwachsenden Baustoff mit hervorragenden Eigenschaften hinsichtlich der Lastaufnahme und –weiterleitung. Neben der sehr hohen Diffusionsoffenheit kann Holz optimal Feuchte aufnehmen, speichern und wieder abgeben, ist aber auch gleichzeitig ein hervorragender Wärmespeicher und auf Grund der trotzdem hohem Masse hinsichtlich des Schallschutzes außerordentlich für Wandelemente geeignet.
Für Wandbauteile kann, vor allem wenn eine hochwertige und holzsichtige Optik erwünscht ist, auf eine große Vielzahl an Qualitäten zurückgegriffen werden. Damit verbunden sind allerdings auch spezielle Sortierungsverfahren und der Anfall von Reststoffen. Die Marktanteile derartiger Gebäude sind aber so überschaubar, dass hier nicht weiter darauf eingegangen werden soll. Auch Brettsperr- und Brettstapelholz wird in den meisten Fällen aus höherwertigen Holzgüten hergestellt, was ebenso zu Reststoffen führt und zusätzlich zur reinen Lastabtragung nicht zwingend nötig wäre.
Um die optischen Ansprüche hinsichtlich der Oberflächenqualitäten nicht schon vorweg zu stark einzuengen, ist eine möglichst freie Auswahl sowohl bei der Außen-, als auch bei der Innenbekleidung angedacht. Dadurch erhält man die Möglichkeit, beim reinen konstruktiven Holzelement solche Werkstoffe einzusetzen, die nicht einer speziellen Sortierung oder Oberflächengüte bedürfen. Es können und sollen sogar möglichst nur geringwertige Holzqualitäten zum Einsatz kommen, wodurch Reste und ansonsten anfallende Nebenprodukte

größtenteils vermieden werden können. Durch diese Materialauswahl wird von vornherein schon bei der Herstellung der Energieverbrauch auf ein Minimum reduziert, was vor allem aus ökologischer und auch aus wirtschaftlicher Sicht weitere Vorteile bewirkt.
Bei diesem Forschungsprojekt sollte die Betrachtung für die Wandelemente sich auf zwei verschiedene konstruktive Möglichkeiten des Aufbaus beschränken – zum einen die Anordnung als Brettstapelelemente und als Brettsperrholzelemente. Somit stellt die Holzmassivbauweise nicht nur eine Alternative zum Holzleichtbau, sondern auch zum Massivbau mit Beton und Mauerwerk dar.

2.1.3 Mineralische Deckschicht

Die Verwendung mineralischer Deckschichten als innerer Raumabschluss von Gebäuden hat eine lange Tradition. Neben den konventionellen Putzen hat innerhalb der letzten Jahrzehnte auch die Anwendung von Plattenwerkstoffen stark zugenommen. Hervorzuheben sei hierbei die sogenannte Gipskartonplatte, welche sich starker Beliebtheit erfreut und, so wird es suggeriert, problemlos auch von Bauherren selbst zu handhaben wäre. Gegen die Handhabung selbst ist grundsätzlich nichts einzuwenden. Allerdings sind einige kritische Anmerkungen hinsichtlich der Oberflächenoptik und zur Interaktion der Materialien untereinander anzumerken. Bei hohen Anforderungen an die Ebenheit der Oberfläche können Plattenwerkstoffe mit einheitlicher Schichtstärke nur begrenzt bis gar nicht einen immer notwendigen Toleranzausgleich ermöglichen. Bei der Montage von Elementgrößen mit mehreren Metern Abmessung sind immer kleinere Unebenheiten an den Oberflächen vorhanden, entweder durch hervorstehende Holzreste oder nicht immer vollständig versenkte Verbindungsmittel. Bei der Plattenbefestigung ergeben sich bei derartigen Ungleichmäßigkeiten Schiefstellungen der Platten. Die Folge dessen sind keine einheitlichen Fluchten an Plattenstößen, was meist problemlos sichtbar ist und einen klaren optischen Mangel darstellt. Hier könnte nur ein großflächiges und sehr zeit-, wie kostenintensives Spachteln Abhilfe schaffen. Ein weiteres Problem dabei wären die sich ergebenden Hohlstellen zwischen den Holzelementen und den Plattenwerkstoffen. Dadurch sind störungsfreie interaktive Transportvorgänge, wie z. B. die Diffusion nicht möglich. Damit wäre eine zusätzliche Nutzung der Holzelemente als Feuchte- und Wärmepuffer nur sehr eingeschränkt möglich und das hohe Potential des hybriden Verbundbauteils könnte nicht ausgenutzt werden.
Aus den aufgeführten Gründen wäre eine toleranzausgleichende, vor Ort aufzutragende Putzschicht mit direktem Verbund zum Holzuntergrund eine effektivere Lösung. Durch eine gute Verzahnung der Werkstoffe könnten Transportvorgänge problemlos stattfinden und eine entsprechende Oberflächenqualität ist je nach Anforderung ausführbar. Übliche Baustoffe dafür sind neben Gips und Kalk in der letzten Zeit auch wieder der Jahrhunderte alte Baustoff Lehm. Die Vorteile sind neben der regionalen Verfügbarkeit, der energiearmen Herstellung und Aufbereitung sowie der vollkommenen Schadstofffreiheit vor allem die raumklimatisch herausragenden Eigenschaften hinsichtlich seiner optimalen Feuchteregulierung. Anfallende Feuchtigkeit in Innenräumen kann vom Lehmputz sehr gut aufgenommen und zwischengespeichert sowie wieder abgegeben werden. So kann ein guter Ausgleich und damit eine Regulierung der Luftfeuchte stattfinden. Je nach Anforderung können auch durch die Abmagerung mit Sand, Stroh oder anderen Faserstoffen und der Variation der Schichtdicke die wärmespeichernden Eigenschaften weiter verstärkt werden. Die Faserstoffe im Lehmputz wirken wie eine Armierung und beugen so wirksam einer Rissbildung durch die natürliche Austrocknung nach dem Putzauftrag vor.
Zur Umsetzung eines nachhaltigen Wandelementes sollten auch bei der Auswahl der Bestandteile der mineralischen Deckschicht grundsätzlich nur Baustoffe zum Einsatz kommen, welche ohne großen Energieaufwand abgebaut und aufbereitet werden können. Der in diesem Sinne sehr geringe Primärenergiebedarf bei der Aufbereitung sollte zusätzlich durch die regionale Verfügbarkeit in engen Grenzen gehalten werden. Aus diesem Grund wurde die Auswahl auf die Materialien Gips, Kalk, Anhydrit und Lehm eingeschränkt.

2.1.4 Hybrides Verbundelement

Konstruktive Holzschicht

Bei der Wahl der konstruktiven Holzschicht fand die Zusammenarbeit mit einem Kooperationspartner aus der Wirtschaft statt. Die Firma Massiv-Holz-Mauer Entwicklungs GmbH (aus Pfronten-Weißbach im Allgäu/Bayern) ist ein führender Anbieter von innovativen, ökologischen Massivholzelementen, welche mittels einer speziellen Fertigungslinie unter anderem auch großformatige Elemente für den mehrgeschossigen Gebäudebau herstellen. Diese bereits seit Jahren praktisch eingesetzten und erprobten Massiv-Holz-Mauer® (MHM)-Elemente bestehen aus kreuzweise im Winkel von 90° miteinander verbundenen Holzlagen und dienten als Ausgangsbasis innerhalb des Forschungsprojektes[1]. Hierbei handelt es sich um sägeraue Resthölzer und Seitenware mit Waldkante, welche andernfalls nur noch zur thermischen Verwertung einsetzbar wären. Als Verbindungsmittel fungieren Aluminium-Rillennägel, dadurch kommen keinerlei Klebstoffe oder anderweitig diffusionshemmende Stoffe zum Einsatz. Die getrockneten, ca. 23 mm starken Bretter werden mit Fräsungen[2] versehen, wodurch eine gerillte Oberfläche entsteht. Die im Bauelement gebildeten stehenden Lufteinschlüsse verbessern den λ-Wert der Wärmeleitfähigkeit und erhöhen somit die Dämmfähigkeit der Wand um rund 30 % gegenüber einem durchgängigen Vollholzquerschnitt. Die abwechselnd gekreuzten Brettlagen minimieren die Quell- und Schwindwirkung des Holzes sehr effektiv und erzielen die gewünschte hohe Formstabilität, Festigkeiten und eine statische Scheibenwirkung. Es können Rohwandelemente mit fünf bis 15 Kreuzlagen und mit Abmessungen von maximal 3,25 m Höhe und bis zu 6,00 m Breite realisiert werden.
In Absprache mit dem Kooperationspartner wurden an den bestehenden Elementen verschiedene Änderungen vorgenommen. Zum einen wurden die Fräsungen längs in den einzelnen Brettern vergrößert, sodass die eingeschlossene Luftmenge und sich damit die Wärmedämmung erhöht. Weiterhin wurde, um einen guten Verbund mit der Putzschicht zu erhalten, die innenseitige letzte Brettlage gedreht, sodass die Oberflächenprofilierung der Brettoberseiten zur raumzugewandten Seite sichtbar sind. Entsprechend der Sortierqualität der Bretter waren auch die Brettlängsseiten nicht konsequent planparallel, wodurch sich zwischen den einzelnen Brettern weitere Zwischenräume und Spaltentiefen in Brettstärke ergaben. Diese schon im Holzgrundelement vorhandenen und für diese Anwendung durchaus erwünschten Oberflächenrauigkeiten und Unregelmäßigkeiten wurden in Vorbereitung der aufzubringenden Putzlage durch werksseitig eingebrachte, s-förmige Fräsungen mit einer Breite von ca. 80 mm und einer Tiefe von ca. 10 mm auf der Wandinnenseite abermals verstärkt, womit neben der reinen sägerauen Oberfläche eine weitere Möglichkeit zur Verzahnung der Materialien stattfand (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Holz-Grundelement mit S-förmigen Fräsungen

[1] MHM-Wandelemente: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, DIBt, Z-9.1-602
[2] Abmessungen der Fräsungen bislang: ca. 3 mm Breite und Tiefe sowie ca. 3 mm Stegbreite

Mineralische Deckschicht

Mit dem zweiten Kooperationspartner (maxit Baustoffwerke GmbH aus Krölpa/Thüringen) wurde intensiv an den Deckschichten geforscht. Damit konnte auf das langjährige sowie hohe Forschungs- und Erfahrungspotential des Wirtschaftsunternehmens zurückgegriffen und die regionale Komponente der verfügbaren Baustoffe bedacht werden. Die Mischungen mussten so optimiert werden, dass nicht zu viel Feuchtigkeit durch das benötigte Anmachwasser in die Holzkonstruktion gelangt, andererseits war auch ein praxisüblicher Auftrag mittels Putzmaschine zu realisieren. Bei saugenden Untergründen wie Holz ergeben sich große Unterschiede hinsichtlich des Abbinde- und Schwindverhaltens. So erforderten die Untersuchungen bezüglich des bestmöglichen Wassergehaltes eine Vielzahl an Testaufträgen, da festzustellen war, dass verschiedene Probekörpergeometrien bzw. Probekörpergrößen sehr konträre Ergebnisse lieferten. Was bei kleinformatigen Abmessungen teilweise zu Rissbildungen führte, zeigte bei Bauteilversuchen mit realitätsnahen Abmessungen wiederum gute Resultate.[3]

Neben Untersuchungen bezüglich des Testauftrages mit Lehm fand eine Konzentration auf die örtlich vorhandenen und energiearm aufzubereitenden Bindemittel Gips, Kalk und Anhydrit statt. Anfangs dienten bewährte Standardmischungen als Grundlage, welche aber aufwendig an die neuen Gegebenheiten angepasst wurden. Hierzu wurde eine Vielzahl an Mischungsrezepturen getestet, um die optimalen Anteile der Mischungsbestandteile inklusive der Überprüfung verschiedener Wassergehalte zu eruieren. Weitere Stellgrößen bei der Zusammenarbeit waren die Auftragsstärke und die zusätzliche Abstimmung mit den Auftragsgeräten. Hierbei sollten zwar praxisübliche Putzmaschinen zur Anwendung kommen, allerdings wurden Testreihen mit verschiedenen Maschinen, Düsen, Kompressoren und Auftragstechniken betrachtet. Um das Aufbrennen der Deckschicht zu unterbinden, war eine entsprechende Vorbehandlung der Holzoberfläche unabdingbar. Nur so konnten effektiv Spannungsrisse in der Deckschicht und übermäßige Quell- und Schwindprozesse auf Grund zu langanhaltender Feuchteeinwirkung auf das Holz gehemmt werden.[4]

Hybrides Verbundbauteil

Grundsätzlich ist die Erstellung des hybriden Verbundbauteils aus den Werkstoffen Holz und mineralischer Deckschicht auf verschiedene Weise möglich – neben einer flächigen Beplankung mittels Plattenwerkstoffen (z. B. GK-oder Lehmbauplatten) soll aber der Focus auf der direkt aufgebrachten Putzschicht liegen. Die Schwierigkeit besteht vor allem in der Verbundfuge, da unterschiedliche Werkstoffe auch verschiedene Ausdehnungskoeffizienten sowie unterschiedliches hygrisches Materialverhalten besitzen. Von Vorteil erweist sich eine sägeraue Oberfläche und auch kleinere Fehlstellen oder Waldkanten an den Brettern erwiesen sich von Vorteil, da eine bessere Verzahnung und Verkrallung der Schichten möglich wird.

Abbildung 2: Auftragsversuche Putztechnik auf unterschiedlichen Oberflächen

Abbildung 3: Mehrlagiger Schichtaufbau: Grund- und Deckputz

[3] weitere Erläuterungen dazu siehe 2. Zwischenbericht, 1. Abschnitt
[4] weitere Ausführungen siehe 1. Zwischenbericht, Abschnitt 1.3

Als Haftvermittler ergab sich nach Versuchen mit verschiedenen Substanzen ein Haftsperrgrund für stark saugende Untergründe als praxistauglichstes Mittel. Dieser ist durch aufsprühen relativ einfach zu applizieren, wodurch auch die tieferliegenden Fräsungen, Fehlstellen oder Hinterschneidungen benetzt werden. Als innerer Raumabschluss wird eine ca. 40 mm starke Putzschicht mehrlagig aufgespritzt (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Die erhöhte Schichtstärke hat mehrere positive Effekte. Sämtliche Elektroinstallationen müssen nicht vorgefräst werden, sondern werden nur auf der Oberfläche befestigt und überputzt. Zusätzliche Ver- und Entsorgungsleitungen können ebenfalls auf Grund der Stärke leichter integriert werden. Selbst die Integration einer Wandflächenheizung mit entsprechender Auftragsstärke ist sehr gut möglich (siehe Abbildung 4) und bewirkt den positiven Effekt einer zusätzlichen Verzahnung mit dem Wandelement.

Abbildung 4: Integrierte Wandflächenheizung

Abbildung 5: Lehmputz–Zwischenlage mit aufgerauter Oberfläche für guten Haftverbund

Ein Hauptkriterium ist allerdings die deutlich gesteigerte Speicherschicht sowohl für die Feuchte-, als auch die Wärmeregulierung. Gerade für den sommerlichen Wärmeschutz spielt die Bauteilmasse einen nicht unerheblichen Einfluss. An dieser Stelle sei als Gegensatz auf die kaum vorzuweisende Masse bei der Holzrahmenbauweise hingewiesen. Mit der höheren Putzstärke gegenüber herkömmlichen Innenputzen kann eine größere Menge anfallender Feuchtigkeit zwischengespeichert werden. Der direkte Verbund der Baustoffe Holz und mineralische Deckschicht wirkt sich ebenfalls sehr positiv auf die Bauklimatik und die Wohngesundheit aus – neben der hohen Diffusionsoffenheit kann auch das Holzbauteil bis zu gewissen Grenzen weitere Feuchtigkeit speichern und abgeben.

In praktischen Auftragsversuchen sind unterschiedliche Mischungsrezepturen getestet worden. Die besten Ergebnisse ergaben sich hinsichtlich niedrigem Wasser/Bindemittel-Wert, hohem Wasserrückhaltevermögen und Einbeziehung der Schichtstärke sowie der Putztechnik bei einer Kombination der Bindemittel Gips, Kalk und Anhydrit. So kann mit der Auftragsvariante frisch-in-frisch direkt aufeinanderfolgend der Grund- sowie Deckputz innerhalb kurzer Zeit sogar mit der erhöhten Schichtstärke aufgebracht werden. Umso wenig Feuchtigkeit wie möglich trotz des vorhandenen Sperrgrundes an das Holz-Grundelement gelangen zu lassen, wurden auch Testreihen mit einem Art Spritzputz auf Anhydritbasis mit nochmals erheblich gesenkten Wasseranteil realisiert. Hierbei erfolgte allerdings eine Durchtrocknung der Grundputzlage, bevor die Deckschicht aufgetragen wurde. Die erhaltenen Ergebnisse waren sehr positiv und auf dieser Grundlage wurden auch Elemente mit Lehmputz beaufschlagt (siehe Abbildung 5). Auf Grund der Grundputzschicht gelang sehr wenig bis kaum Feuchtigkeit aus dem Lehm ins Holzelement. Der mehrlagige dünne Schichtenaufbau war unkompliziert in der Handhabung, allerdings traten beim Transport und dem Einbau des Elementes mit Abmessungen von 180 x 250 cm auf Grund deutlich geringerer Materialfestigkeiten gegenüber den bisher untersuchten Putzvarianten leichte Risse auf. Ein weiterer Nachteil der Beaufschlagung der Putzschicht im Vorfeld der Montage wären die deutlich höheren zu transportierenden Lasten. Beim Putzauftrag im fertig errichteten Gebäude sind kei-

nerlei Bewegungen und damit auf die Putzschicht übergehende Spannungen möglich und somit wäre diese Bauablauffolge zu empfehlen.

Außenseitig sind die verschiedensten Möglichkeiten zur individuellen Fassadengestaltung denkbar, da auf oder am Holz Verbindungsmittel einfach und sicher zu befestigen sind, allerdings sollte, um insgesamt das überaus nachhaltige sowie energiearme Gesamtkonzept eines Passivhauses zu erhalten, auf eine natürliche Dämmung, wie z. B. Holzfasern, Hanf oder Schilfrohr zurückgegriffen werden. Als Wetterschale sind neben Putzvarianten auch Holzverschalungen denkbar (Abbildung 6)[5]. Ein schematischer Querschnitt mit den einzelnen Schichten des hybriden Verbundbauteils und einem beispielhaften Innenputz aus Lehm ist in Abbildung 7 dargestellt.

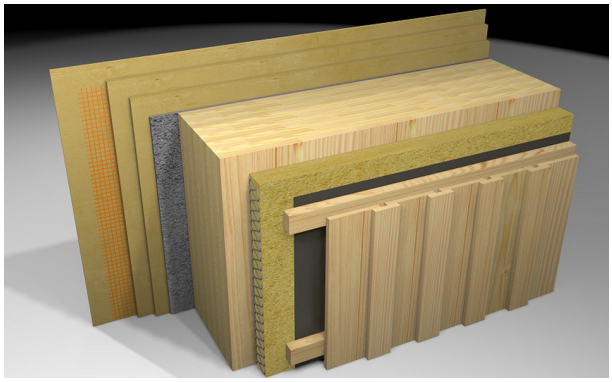


Abbildung 6: Holzschalung als eine Möglichkeit der Außenwandbekleidung

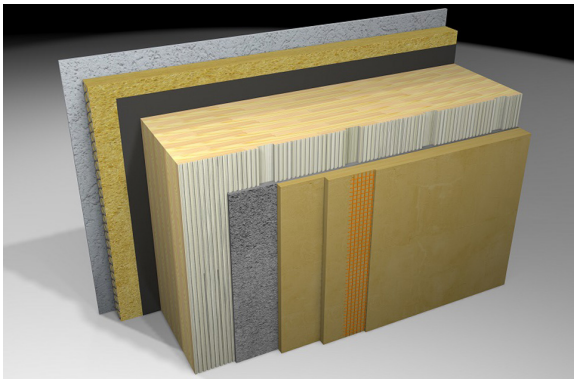


Abbildung 7: Systemaufbau des Hybridbauteils

[5] Eine weitere Möglichkeit der äußeren Montage der Holzschalung (horizontal) ist in Anhang 1 dargestellt

2.2 Versuche an Hybridbauteilen

2.2.1 Einleitung

Gegenstand der nachfolgend dargestellten experimentellen Versuche waren Untersuchungen zum Einfluss einer direkt auf die Holzoberfläche applizierten mineralischen Deckschicht auf das Schubtragverhalten aussteifender, horizontal beanspruchter Wandscheiben. Aufgrund der bei Holz stark streuenden Materialeigenschaften, bedingt durch dessen inhomogenen Aufbau, waren detaillierte Aussagen zum Tragverhalten, nicht wie sonst üblich, mit Modellmaßstäben, sondern nur mit praxisnahen Abmessung möglich. Ferner zeigten vorangegangene Versuche mit kleinteiligen Prüfkörpern ein deutlich sensibleres hygrisches Verhalten hinsichtlich einer direkten Beaufschlagung von Feuchtigkeit während des Putzvorganges auf die Holzoberfläche und somit eine irreparable Schädigung der Verbundfuge, so dass diese nur bedingt für eine aussagekräftige, praxistaugliche Modellierung dienen konnten.

2.2.2 Probekörper

Zur Durchführung der Wandversuche waren Probekörper mit realitätsnahen Abmessungen notwendig. Aus diesem Grund wurden Elemente mit 250 cm Höhe und 180 cm Breite verwendet. Bei den konstruktiven Holzelementen wurden einerseits Massiv-Holz-Mauer®-Elemente (MHM) und Brettstapelelemente untersucht.
Die MHM-Elemente (siehe Abbildung 8) bestanden aus insgesamt fünf Brettlagen, welche untereinander um 90° gedreht miteinander verbunden, d.h. drei Brettlagen waren senkrecht und zwei Brettlagen horizontal zur Einbaulage angeordnet waren. Untereinander sind die jeweiligen Brettlagen mittels Aluminium-Rillennägeln an den Kreuzungspunkten miteinander befestigt. Die in allen Brettern vorhandenen Fräsungen zur Reduzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten waren normalerweise so angeordnet, dass sie außen nicht sichtbar waren – im Falle der Probekörper fand eine Modifizierung statt: die später auf der Rauminnenseite befindliche Brettlage wurde gedreht, sodass die Rillenfräsungen sichtbar waren. Damit ergab sich eine Erhöhung der Oberflächenstruktur und somit eine bessere Verkrallungsmöglichkeit der Putzschicht. Zum Schutz des Holzes vor zu hohem Feuchteeintrag, wurde die Oberfläche im Vorfeld der Putzarbeiten mit einem diffusionsoffenen Sperrgrund flächendeckend aufgesprüht. Dieser Sperrgrund diente gleichzeitig als Haftbrücke zwischen beiden Materialien. Bei der direkt und ohne zusätzlichen Putzträger aufgebrachten Deckschicht mit einer Gesamtstärke von ca. 40 mm, handelte es sich bei den Probekörpern um einen Kalk-Gips-Anhydritputz, welcher in zwei Lagen aufgebracht wurde. Hierbei wurde die zweite Decklage auf die nur kurz „angezogene“, aber noch weiche Grundputzlage im Verfahren „frisch-in-frisch“ aufgebracht. Zur Verhinderung einer Rissbildung nach der Erhärtung der Deckschicht in Folge feuchteabhängiger Quell- und Schwindprozesse des Holzes wurde im oberen Drittel der Deckschicht ein Armierungsgewebe mit einer Maschenweite von 8x8 mm eingelegt. Die Trocknung erfolgte innerhalb 28 Tagen unter Normklima.

Bei den untersuchten Brettstapelwände (siehe Abbildung 9) erfolgte die Verbindung der einzelnen Lamellen lediglich mittels im konstanten Abstand von 30 cm über die Höhe verteilt angeordneten Hartholzdübeln, welche im Vorfeld leicht heruntergetrocknet eingesetzt, im Wandbauteil leicht aufquellen und somit eine formstabile Verbindung gewährleisten. Bei den Holzlamellen der Brettstapelwände handelte es sich um 40 mm dicke und 100 mm hohe, sägerau belassene Nadelhölzer der Festigkeitsklasse C24, wobei die teilweise abstehenden Fasern der Holzoberfläche zusätzlich dem Verbund mit der mineralischen Deckschicht dienten. Im Gegensatz zu den MHM-Elementen wurde bei der Herstellung der Brettstapel-Verbundelemente auf eine zusätzliche Grundierung verzichtet, welche sich nach dem Abbinden des Anhydrits durch kleine Risse in der Deckputzlage im Bereich benachbarter Lamellen als nachteilig erwiesen.

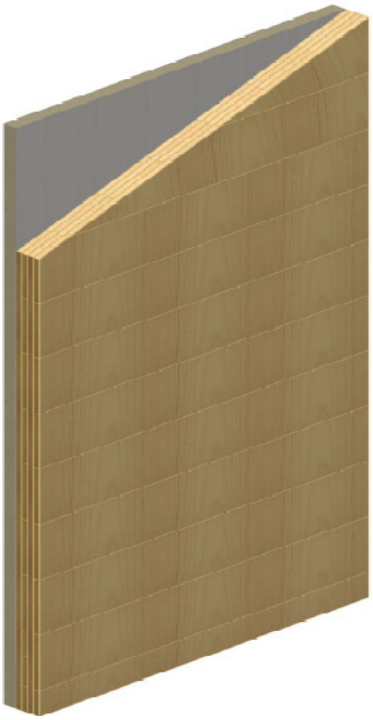


Abbildung 8: Wandelement Massiv-Holz-Mauer®

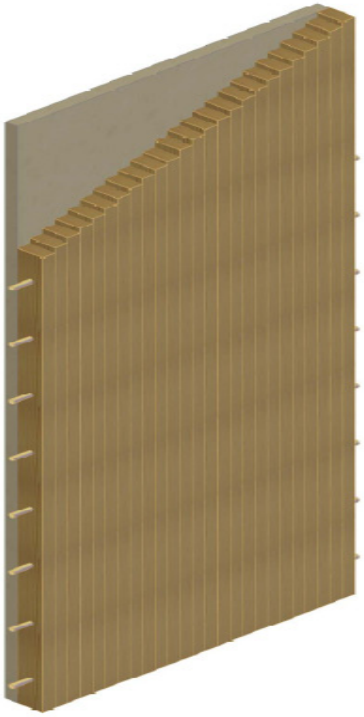


Abbildung 9: Wandelement Brettstapelbauweise

Als Übersicht über die im nachfolgenden beschriebenen großformatigen Wandprüfkörper soll Tabelle 1 dienen. Hier sind die Wandprobekörper der Massiv-Holz-Mauer®- und Brettstapel-Elemente aufgeführt, welche in Bauteilversuchen untersucht wurden. Neben verschiedenen Holzoberflächen/Strukturierungen wurden auch die beschriebenen Putzauftragsvarianten bei den anschließenden Wandversuchen gegenübergestellt. Die in den anschließenden Diagrammen als Grundelement bezeichneten Probekörper sind Rohelemente ohne Deckschicht, die Bezeichnung Verbundelement bezieht sich auf Probekörper mit Deckschicht.
Jedoch wurde sich bei der Auswahl der im Forschungsbericht dargestellten Versuchsergebnisse nur auf einzelne, charakteristische Ergebnisse bezogen.

Tabelle 1: Hybride Wand-Elemente mit Variation der Oberflächen und Deckschichten

Probe-körper	Holzoberfläche	Haftver-mittler	Deckschicht
PK01	MHM-Element, sägerau, profiliert mit 3x3x3 mm Fräsungen vertikal	nein	zweilagig frisch-in-frisch aufgetragener Gips-Kalk-Anhydrit-Putz
PK02	MHM-Element, sägerau, profiliert mit 6x4x3 mm Fräsungen vertikal + S-Fräsungen, mit seitl. Wandanschlüssen	ja	zweilagig frisch-in-frisch aufgetragener Gips-Kalk-Anhydrit-Putz[6]
PK03	MHM-Element, sägerau, profiliert mit 6x4x3 mm vertikal verlaufend + S-Fräsungen	ja	Anhydrit-Grundputz und zweilagiger Gips-Kalk-Anhydrit-Putz
SW-DG-LE	Brettstapelelement, sägeraue, ebene Oberfläche	nein	einlagig aufgebrachter Anhydritputz

[6] gegenüber dem PK01 Verbundelement wurde der Wasserbedarf nochmals verringert

Im Fall des dargestellten Prüfkörpers PK01 waren die sägerauen Holzlamellen in Längsrichtung mit einer Fräswelle 3 x 3 x 3 mm (Fräsbreite x Frästiefe x Stegbreite) bearbeitet. Bei der Holzgüte handelt es sich aufgrund ökonomischer Gesichtspunkte um sogenannte Seitenware, also Bretter geringerer Qualität, welche jedoch aufgrund der massiven Anordnung im Wandbauteil ausreichend Tragreserven hinsichtlich des vertikalen Lastabtrages aufweisen. Zur besseren Verzahnung mit der mineralischen Deckschicht wurden die werkseitig gefrästen Decklamellen mit der Fräsung nach außen angeordnet (siehe Abbildung 10) und anschließend, ohne vorheriger Grundierung, direkt angeputzt (siehe Abbildung 11). Bei der Deckschicht handelte es sich um einen, mit der Firma maxit Baustoffwerke GmbH entwickelten, modifizierten Gips-Kalk-Anhydritputz, welcher hinsichtlich ökologischen, bauklimatischen als auch technologischen Ansprüchen entwickelt wurde. Der Putzauftrag erfolgte in zwei Schritten. Nach dem Aufbringen der ca. 20 mm starken Grundputzlage, wurde im Verfahren „frisch-in-frisch“ eine zweite Putzlage mit dem gleichen Material aufgetragen. Aufgrund des hohen Wasserbedarfs bei der Verarbeitung erwies sich jedoch die fehlende Grundierung der Holzoberfläche am Anfang als nachteilig.

Abbildung 10: PK01: Grundelement, sägerau

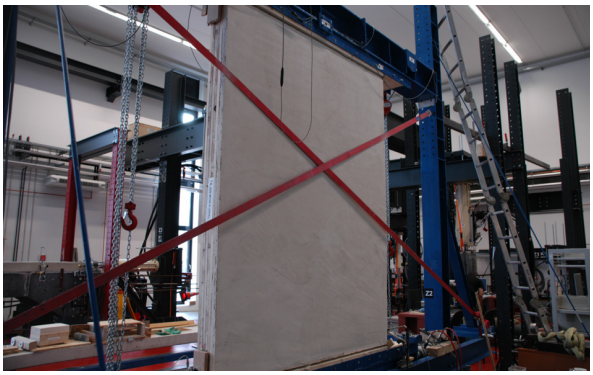


Abbildung 11: PK01: Verbundelement im Versuchsstand

Zusätzlich zu den oben genannten Fräsungen mit dem Ziel der Herabsetzung des Wärmedurchgangskoeffizienten, wurden weitreichende Untersuchungen zur Steigerung des mechanischen Formschlusses zwischen Holz und Putz durchgeführt. Neben der Variation der Fräsbreite und Frästiefe fanden auch Untersuchungen mit verschiedenen Achsabständen der Fräsungen statt, um gleichzeitig den Herstellungsaufwand, vor allem im Hinblick auf die benötigte Zeit der Elementbearbeitung, in einem akzeptablen Rahmen zu halten.

Die bei Probekörper PK02 verwendete S-förmige Fräsung (siehe Abbildung 12) mit einer Breite von 80 mm, einer Tiefe von 10 mm und einem Achsabstand von 200 mm erzielte hierbei die besten Ergebnisse. Ferner wurde die in PK01 verwendete Fräswelle durch eine mit gröberem Fräsbild substituiert[7]. Breitere Ausfräsungen und Stege sollten eine günstigere Verzahnung bewirken, da bei der Fräsung mit 3 x 3 x 3 mm schon Probleme hinsichtlich des Größtkornes aus dem Putz eine optimale Verzahnung verhinderte. Zur Vermeidung des seitlichen Abhebens der Putzschicht, dem sogenannten „Schüsseln“, infolge Überschreitung der Haftzugfestigkeit des Verbundes durch unterschiedliche Feuchtigkeitsgradienten über die Putzschichtdicke, wurden als zusätzliche Maßnahme für den Probekörper PK02 seitliche Wandanschlüsse angeordnet, welche in Abbildung 13 zu erkennen sind. Dadurch konnte, wie im realistischen Anwendungsfall, die Innenecke überputzt werden und somit freie, in den meisten Gebäuden kaum vorhandene Wandenden ausgeschlossen werden. Der Einfluss der zusätzlichen, kurzen Wandecken auf die Gesamtsteifigkeit ist durch einen nachgiebigen Anschluss an den Probekörper zu vernachlässigen und diente ausschließlich der Darstellung einer praxisnahen Einbausituation. Infolge der gegenüber PK01 modifizierten Oberflächenstruktur sowie des aufgebrachten Sperrgrundes auf die Holzoberfläche wurde ein deutlich

[7] Fräsbreite/Frästiefe/Stegbreite = 6/3/4 mm

verbessertes Verbundverhalten beider Materialien erzielt, was sich durch die während des Versuches aufgetretenen Schubrisse in der Putzlage klar darstellen lässt.

Abbildung 12: PK02 Grundelement mit S-Fräsung und aufgesprühtem Haftvermittler

Abbildung 13: PK02 Verbundelement mit seitlichen Wandanschlüssen

Trotz stattgefundener, intensiver Vorbehandlung der Holzoberfläche mit dem aufgesprühten Haft- und Sperrgrund für stark saugende Untergründe der Firma maxit Baustoffwerke GmbH traten vermehrt nach dem Abbinden der Putzschicht und der somit einhergehenden Feuchtigkeitsabnahme kleine Haarrisse in der Putzschicht auf, welche durch Schwindprozesse des Holzes zu begründen sind. Zur Vermeidung dieses Effektes wurde die erste Putzlage mit einem modifizierten Anhydritputz mit signifikant herabgesetztem Wasser-Bindemittel-Verhältnis, welcher gerade noch mit einer handelsüblichen Putzmaschine förderbar ist, mit erhöhtem Druck auf das Holzbauteil aufgebracht und somit eine stark strukturierte Putzoberfläche geschaffen (siehe Abbildung 14). Nach einer eintägigen Abbindephase der nur ca. 5 mm starken Grundputzlage wurde anschließend, wie auch bei den Probekörpern PK01 und PK02, der zweilagige Deckputz im Frisch-in-Frisch-Verfahren bis zu einer endgültigen Stärke von 40 mm appliziert (Abbildung 15). Der während der Abbindephase der Deckschicht anfallende Wasserüberschuss im Putz konnte so durch die bereits abgebundene Grundputzlage vom Holz weitestgehend ferngehalten werden.

Abbildung 14: PK03 Grundelement + Grundputz

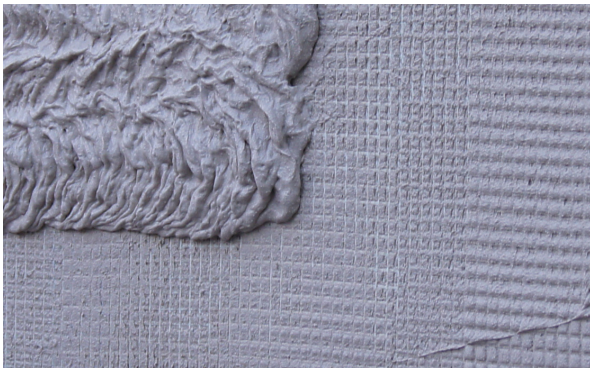


Abbildung 15: PK03 Aufbringen des Oberputzes

2.2.3 Wand-Schubversuche

Bei der Belastung der Elemente nach 28 Tagen erfolgte das Aufbringen der Horizontalverschiebung weggesteuert über die am Wandfuß befindlichen, horizontal angeordneten Hydraulikzylinder, welche in den Grundversuchen (siehe Abbildung 16) Auslenkungen aus der Mittellage von 5 mm bis 30 mm in beiden Richtungen vorsahen. Die dabei zu den Einwirkungen der Wand (z.B. aus Wind respektive Erdbebenbeanspruchung) im Gleichgewicht stehenden Bauteilwiderstände wurden durch am Zylinder montierte Kraftmessdosen kontinuierlich über die Versuchsdauer gemessen. Die vertikale Auflast, wurde mit Hilfe eines Ballastgewichtes über ein Hebelsystem als Gleichstreckenlast über die gesamte Wandbreite eingeleitet und betrug in den Grundversuchen einen konstanten Wert von etwa 25 kN/m, was zirka der Normalkraftbeanspruchung einer Wandscheibe eines 4-geschossigen massiven Holzhauses entspricht.
Neben dem Lastregime mit 5/10/20/30 mm beidseitiger Auslenkung wurden ferner zyklische Belastungsversuche gemäß ISO 21581, wie in Abbildung 17 dargestellt, durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen waren, Aussagen zur Schädigung sowie Aussagen zum Dissipationsvermögen des Verbundbauteils zu treffen. Hierbei wurde die Versuchswand einer niederzyklischen Fußpunktauslenkung bis maximal 50 mm ausgesetzt, wobei jede Verschiebungsamplitude dreimal mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 2,4 mm/min durchlaufen wurde.
Ausgehend von den experimentellen Versuchen zur Steifigkeitsermittlung der Grundelemente, das heißt des „rohen“ Holzbauteils, wurde anschließend die mineralische Deckschicht aufgebracht und nach der Trocknung der gleiche Prüfkörper als Verbundelement getestet, um beide Steifigkeiten gegenüberzustellen.

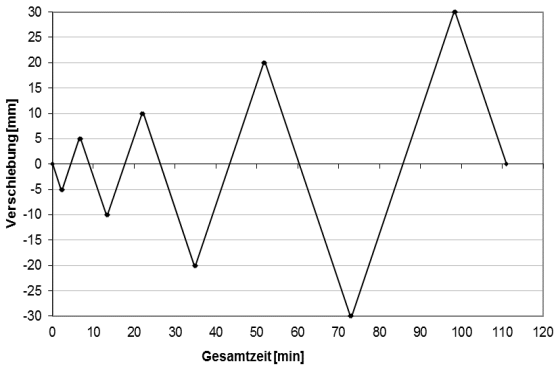


Abbildung 16: Lastregime Grundversuche 5/10/20/30 mm

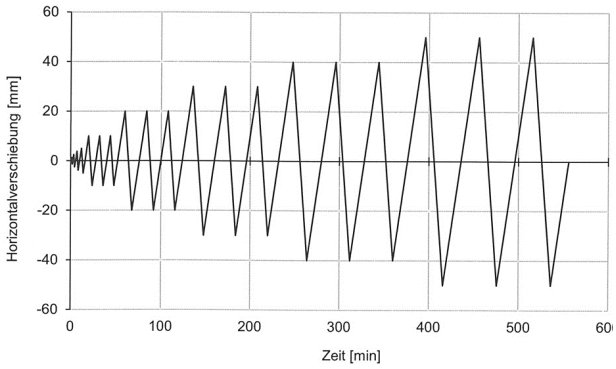


Abbildung 17: Lastregime zyklische Versuche

Ein Vergleich der Grundelemente PK01 und PK02 in Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigt, dass diese aufgrund gleicher Wandabmessungen und Lagerbedingungen erwartungsgemäß annähernd die gleiche Steifigkeit aufweisen. Der geringfügig steilere Anstieg im Kraft-Verformungsdiagramm des Wandprobekörpers PK02 ist durch die zusätzlichen konstruktiven, aber dennoch aussteifend wirkenden seitlichen Ecken zur Verhinderung des „Schüsseleffektes“ der mineralischen Deckschicht zu interpretieren. Gegenüber der getesteten „rohen“ Brettstapelwand (SW-DG-LE) gleicher Abmessungen, welche bereits bei 10 mm Auslenkung aufgrund großer plastischer Verformungen der Holzlamellen im Bereich der Hartholzdübel kaum noch zusätzliche Kräfte aufnehmen kann, wiesen die MHM-Grundelemente eine zirka 3-fach höhere Steifigkeit gegenüber horizontalem Lastangriff auf. Dennoch zeigten sich bei den Vorversuchen der Grundelemente, auch im Falle der MHM-Wände, ausgeprägte plastische Restverformungen aufgrund der nachgiebig miteinander verbundenen Lamellen. Aus diesem Grund wurden die Grundelemente anschließend zur Steigerung ihrer Eigensteifigkeit mit einer zusätzlich aussteifenden mineralischen Deckschicht belegt.

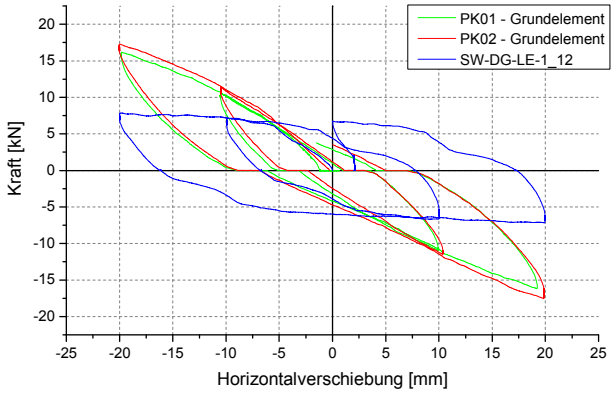


Abbildung 18: Kraft-Verformungsverlauf der Grundelemente

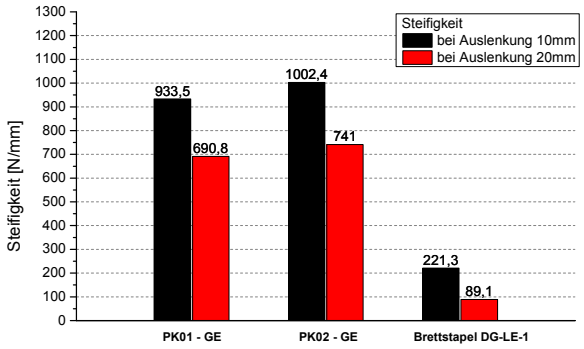


Abbildung 19: Vergleich der Steifigkeiten der Grundelemente

Das Grundelement PK01 besaß eine Anfangssteifigkeit von 934 N/mm, welche mit zunehmender Auslenkung aufgrund der herstellungsbedingt fehlenden Kontaktflächen zwischen den einzelnen Lamellen und der nachgiebigen Verbindung mittels Aluminiumnägeln abnahm. Hierbei sei erwähnt, dass durch den Einsatz geringwertiger Hölzer teilweise Seitenkanten nicht vollständig planparallel sind, Waldkanten und weitere leichte Unregelmäßigkeiten an den einzelnen Brettern vorliegen. Zusätzlich sind teilweise einige Millimeter Spielraum zwischen den einzelnen Brettern. Durch diese Umstände und die relativ nachgiebigen Verbindungsmittel aus Aluminium sind Verformungen im Holzgrundelement möglich. Aufgrund der somit resultierenden unabhängigen Verschiebungen der einzelnen Lamellen untereinander, ist die Steifigkeit deutlich geringer als z.B. bei geklebtem Brettsperrholz. Durch direktes Aufbringen einer mineralischen Verbundschicht konnte jedoch die Anfangssteifigkeit bei dem Verbundelement PK01, bis zu einer Auslenkung von 10 mm, gegenüber dem Grundelement um zirka 55 % gesteigert werden.
Ferner zeigt sich in Abbildung 21, dass trotz einer anfänglich guten Verzahnung zwischen beiden Materialien mit zunehmender Auslenkung die Verbundfuge stetig geschädigt wird. Ursächlich hierfür waren lokale Ablöseerscheinungen des Putzes von der Holzoberfläche durch zu wenig respektive einer zu feingliedrigen Profilierung der Holzlamellen. Beste Verbundergebnisse erzielte PK03, welcher sowohl eine nochmals gegenüber dem Verbundelement PK01 gesteigerte Anfangssteifigkeit, als auch eine deutlich geringere Regression der Steifigkeit infolge zyklischer Lastschleifen aufwies. Gegenüber dem Grundelement konnte durch die zusätzlichen S-förmigen Fräsungen und einer gröberen Grundprofilierung eine deutliche Steifigkeitserhöhung von etwa 80 % erreicht werden.

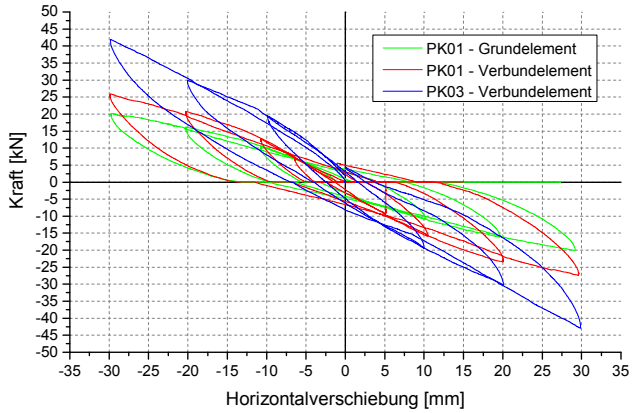


Abbildung 20: Kraft-Verformungsverläufe PK01 und PK03

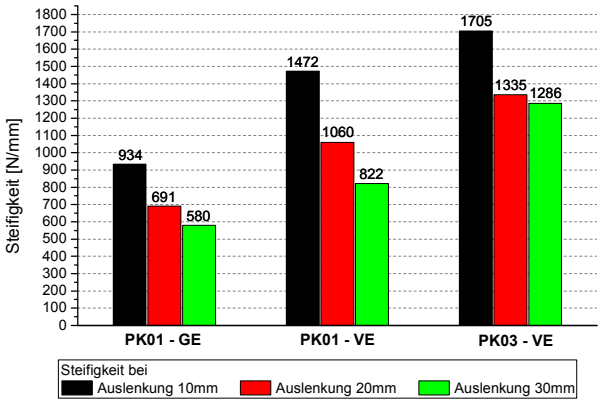


Abbildung 21: Vergleich der Steifigkeiten PK01 und PK03

Neben der in Abbildung 20 deutlich zu erkennenden höheren Steifigkeit des Probekörpers PK03, zeigt sich nach 30 mm Auslenkung ein nahezu linearer Anstieg des Kraft-Verformungsverhaltens. Bei genauerer Betrachtung der Steifigkeiten in Abhängigkeit von der Auslenkungsamplitude in Abbildung 21 wird ferner deutlich, dass diese, anders als bei PK01, nach dem Abbau des anfänglichen Schlupfes kaum noch sinkt und sich somit auf einen sehr guten Verbund beider Materialien schließen lässt. Diese Vermutung wurde im Anschluss nach dem Zerlegen und Trennen beider Komponenten bestätigt. Ein großflächiges Lösen der Putzschicht von der Holzoberfläche war nur bei PK01 möglich. PK03 hingegen konnte nur bruchstückartig von der Holzoberfläche getrennt werden und besaß trotz der im Versuch aufgezwängten hohen Verformungen, gerade im Bereich der zusätzlichen S-förmigen Fräsungen einen starren Restverbund.

Die an ISO 21581 angelehnte Versuchsreihe PK03 mit zyklischer Belastung diente zur Beurteilung der Schädigung sowie der dissipierten Energie. Das ausgeprägte plastische Verformungsvermögen der Verbundwand zeigte sich in Form der in Abbildung 22 dargestellten Hysteresekurve, wobei die Hüllkurve der Kraft-Verformungslinie ein Maß der Duktilität darstellt und vor allem im Bereich erdbebengerechtes Bauen von besonderem Interesse ist, um ein schlagartiges Versagen ohne Vorankündigung zu verhindern. Aufgrund des hohen Verformungsvermögens der nachgiebigen Verbindung der einzelnen Holzlamellen mittels metallischer Verbindungsmittel weist das Grundelement, die Massiv-Holz-Mauer®, bereits eine hohe Duktilität auf. In Kombination mit der dazu steifen mineralischen Deckschicht wurde die Verbundfuge so ausgebildet, dass Schubkräfte vom Holz in die Putzschicht übertragen werden können, ohne dass diese global versagt und sich die Putzschicht vollständig von der Holzoberfläche ablöst. Zur Beurteilung des Schädigungsfortschrittes der Verbundfuge wurde der Wandfuß weit über das zulässige Verformungsmaß bis maximal 50 mm ausgelenkt. Selbst bei diesen Auslenkungen verfügte der Wandprüfkörper noch über ausreichend Tragreserven hinsichtlich dessen Bruchfestigkeit.
Beginnend mit vier Zyklen geringer Auslenkung (grün dargestellt), welche jeweils einmal je Richtung durchfahren wurden und lediglich der Stabilisierung des Bauteils dienten, folgten im direkten Anschluss die eigentlichen Steifigkeitszyklen (rot dargestellt), bei welchen dreimal gleich große Verschiebungsamplituden simuliert wurden. Die in Abbildung 23 dargestellten ermittelten Steifigkeiten einer Verschiebungsstufe zeigen nur geringfügige Änderungen untereinander, was auf eine nur leichte Zunahme lokaler Schädigungen infolge wiederkehrender Belastung schließen lässt. Die regressive Steifigkeitsentwicklung ist hierbei nicht unbedingt auf ein Versagen der Verbundfuge zurückzuführen, sondern vielmehr auf eine Schubrissbildung in der Deckschicht. Erste Risse in der mineralischen Putzschicht stellten sich erst bei Auslenkungen von über 40 mm ein und traten somit erst deutlich oberhalb der im Hochbau tolerierbaren Kopfpunktverformungen auf.

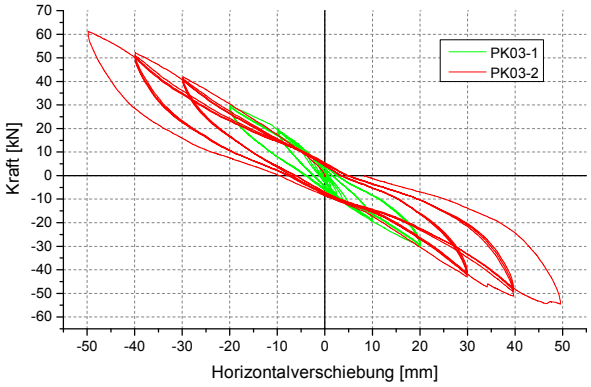


Abbildung 22: Kraft-Verformung PK03–Verbundelement

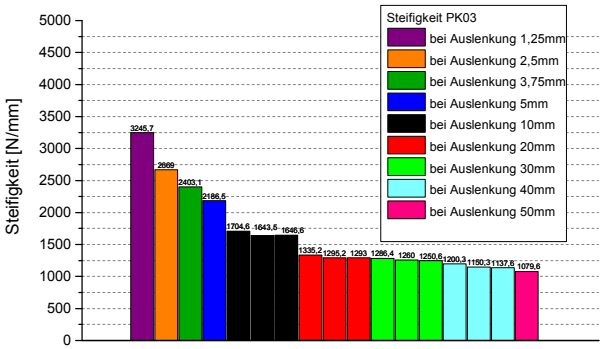


Abbildung 23: Steifigkeiten PK03 - Verbundelement

2.3 Montagefugen und Detailpunkte

2.3.1 Einleitung

Grundsätzlich zeichnen sich die hybriden Massivholz-Verbundkonstruktionen durch einen hohen werksseitigen Vorfertigungsgrad aus, allerdings muss bei der Entwicklung der Detailpunkte auf den für die baustellenseitige Montage wichtigen Toleranzausgleich geachtet werden. Nur so kann eine reibungslose und schnelle Montage erfolgen und infolgedessen eine wirtschaftliche Lösung für die mehrgeschossige Bauweise erzielt werden. Des Weiteren müssen die statischen und bauphysikalischen Anforderungen in der Ausbildung der Anschlussdetails bei gleichzeitig möglichst geringem Aufwand erfüllt werden. Die Entwicklung optimaler konstruktiver Detaillösungen erfordert somit die Bewertung verschiedener Anschlussvarianten. Auf den folgenden Seiten werden zu einzelnen Knotenpunkten jeweils verschiedene Lösungsvarianten vorgestellt und deren Vor- und Nachteile aufgeführt.

2.3.2 Kellerdeckenanschluss

Besonderes Augenmerk gilt dem Anschlussdetail der Fassade an das massive Kellergeschoss, da hier die Grundlage für die darauffolgenden Geschosse geschaffen wird. Aufgrund dessen muss bei der Ausführung mit höchster Präzision vorgegangen werden. Des Weiteren müssen von hier aus alle auf das Bauwerk wirkenden Lasten inklusive der Bauteileigenlasten sicher in das Kellergeschoss abgeleitet werden. Eine Möglichkeit der Realisierung des Kelleranschlusses ist in Anhang 5 aufgezeigt. Bei diesem Detailvorschlag fand eine Orientierung an den Ausführungen der Massiv-Holz-Mauer® statt.
Hier dient ein Mörtelbett als Toleranzausgleich der massiven Kellerdecke. Jedoch werden bei diesem Detailvorschlag zwei Schwellen verbaut - eine dünnere Schwelle und zum anderen eine nahezu quadratische Richtschwelle, welche im Mörtelbett einnivelliert und ausgerichtet werden. Durch die stufenförmige Anordnung der beiden Schwellen kann die Richtschwelle als Anschlagspunkt genutzt werden, um das vorgefertigte Holzwandelement zügig und problemlos bei der Montage auf den Schwellhölzern positionieren zu können. Die Richtschwelle wird mit Betonschrauben an die Kellerdecke befestigt. Ebenfalls an der Richtschwelle werden mittels Gewindeschrauben die Brettsperrholz-Wandelemente montiert. Hierbei ist zu beachten, dass die Betonschrauben und die Gewindeschrauben zueinander versetzt angeordnet werden müssen. Die Aussparung für die Richtschwelle wird in den Wandelementen bereits werksseitig eingefräst. An Stelle von Fugenbändern wird bei dieser Variante eine an der Wandaußenseite liegende, diffusionsoffene sowie winddichte Konvektionssperre angebracht.
Beim Fußbodenaufbau über der Kellerdecke ist aus Schallschutzgründen auf eine Schallentkopplung zu achten, um die Schallweiterleitung zu verhindern oder zu minimieren. Dabei wird der Fußbodenaufbau „schwimmend“ ausgeführt, indem der Zementestrich auf einer Trittschall- / Wärmedämmung eingebracht wird. Außerdem dient ebenso ein seitlicher Randdämmstreifen der Körperschallentkopplung und kann gleichzeitig als Schalung bei Herstellung der Estrichplatte genutzt werden.
Ein visualisiertes 3-D-Modell des Kellerdeckenanschlusses befindet sich in Anhang 6.

2.3.3 Geschossdeckenanschluss

Nach der Montage der Wandelemente des Erdgeschosses stellt der Anschluss der Geschossdecken einen weiteren Knotenpunkt in der Gebäudestruktur dar. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird angestrebt, dass alle vorgefertigten Decken- und Wandelemente identische Maße und Einfräsungen besitzen, unabhängig davon in welchem Geschoss diese montiert werden. Die einzige Ausnahme soll hier das Dachgeschoss darstellen, da an den Holzwandelementen des letzten Geschosses am Wandkopf Einfräsungen für die Fußpfette vorgesehen werden.

Bei einer Detaillösung, wie im Anhang 7 dargestellt, wird eine Unterbrechung der Wandkonstruktion ausgeschlossen und die Deckenelemente an den Wandinnenseiten angehängt. Dies wird durch einen gleichschenkligen Stahlwinkel realisiert, welcher am Wandkopf montiert wird und als Konsole fungiert. Aus wirtschaftlichen Aspekten sollten standardisierte Walzprofile verwendet werden. Die Stahlwinkel sind werkseitig jeweils mit entsprechenden Bohrungen versehen, damit der Winkel mittels zweier Gewindeschrauben an der Brettsperrholzwand fixiert werden kann. Vor dem Auflegen der Brettstapeldecke wird auf dem Stahlprofil eine elastische Lagerung und ein Randdämmstreifen angebracht, um den erhöhten Schallschutzanforderungen für mehrgeschossige Bauwerke gerecht zu werden.

2.3.4 Traufanschluss

Allgemein existiert für diesen Knotenpunkt eine Vielzahl an Möglichkeiten bezüglich der konstruktiven Durchbildung. Im Folgenden wird sich lediglich auf eine Detaillösung mit einer Pfettendachkonstruktion beschränkt, welche sich sehr stark an den Ausführungen des Detailkataloges der Firma Massiv-Holz-Mauer® (MHM) orientiert. Neben der innenliegenden Putzschicht muss an der Oberseite auf eine elastische Fuge geachtet werden, um der Bildung von späteren Rissen im Putz entgegenzuwirken. Des Weiteren ist eine Dampfbremse unter der Untersparrendämmung vorzusehen, damit Kondensatbildung in der Bauteilebene ausgeschlossen werden kann. Rauminnen ist auf der Dampfbremse ein Putzträger auszuführen, andernfalls haftet der Innenputz nicht auf dem glatten Untergrund. Außerdem wird als Abschluss der Traufbohle bzw. Konterlattung ein Lüftungsband ausgeführt, um eine Zirkulation zu ermöglichen, aber auch Insekten abzuhalten. Ergänzend zur Dachrinne ein Tropfblech anzuordnen. Die Holzwandelemente werden mit einer außenseitigen Aussparung am Wandkopf versehen, damit die Fußpfette auf der Wand aufgelagert und befestigt werden kann (siehe Anhang 8).
Bei der praxisgerechten Umsetzung ist die Gebrauchstauglichkeit, vor allem die Risssicherheit zu gewährleisten und zu beachten. Aufbauend auf der insgesamt schon sehr hohen Steifigkeit der Holzelemente fand durch die Aufbringung der mineralischen Deckschicht eine zusätzliche Versteifung bzw. Steifigkeitserhöhung statt, sodass die hybriden Verbundelemente insgesamt als „starre Scheibe“ angesehen werden können. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass den Anschlusspunkten der Elemente und den Verbindungen zu Decken- sowie Dachelementen, vor allem bei der Betrachtung im mehrgeschossigen Holzbau, entscheidende Bedeutung zukommt.

Weitere Anschlüsse und Detaildarstellungen befinden sich im Anhang.

2.4 Bauphysik und Simulation

In diesem Kapitel soll exemplarisch eine Brettsperrholz-Anhydrit-Verbundkonstruktion mittels bauphysikalischer Berechnungen untersucht und auf die unterschiedlichen Simulationen im Bereich der Bauphysik und der Eingrenzung zum Aufwand der Durchführung experimenteller Untersuchungen eingegangen werden. Dazu wird eine Außenwand betrachtet, welche die Kriterien des Passivhaus-Standards erfüllt. Ein solcher Passivhaus-Wandquerschnitt ist in Abbildung 24 abgebildet. Innenseitig ist eine Deckschicht aus Anhydritputz mit einer Stärke von 60 mm ausgeführt.

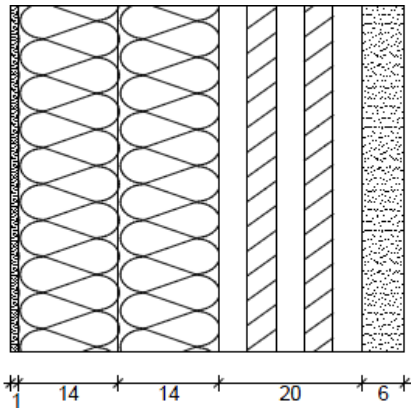


Abbildung 24: exemplarischer Wandquerschnitt für Passivhaus-Berechnung

U-Wert-Berechnung

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die einzelnen Komponenten des Wandaufbaues mit den dazugehörigen Wärmeleitfähigkeiten λ sowie der sich daraus ergebene U-Wert. Die jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten wurden entweder den Herstellerangaben oder aus einschlägigen Tabellenbüchern entnommen.

Tabelle 2: U-Wert Berechnung für Passivhaus-Wandaufbau

Schicht	Dicke	Wärmeleitfähigkeit	Wärmedurchlasswiderstand	Wärmedurchgangskoeffizient
	d	λ	RT = d/λ	U = 1/RT
	[mm]	[W/(mK)]	[(m²K)/W]	[W/(m²K)]
Wärmeübergang Rsi			0,13	
Anhydrit	60	1,2	0,05	
Brettsperrholz	200	0,13	1,54	
Holzfaserplatte	280	0,045	6,22	
Kalk-Zement-Putz	10	1	0,01	
Wärmeübergang Rse			0,04	
Summe	550		8,03	**0,13**

Es ist zu erkennen, dass sich für diesen Wandaufbau ein U-Wert von 0,13 W/(m²K) ergibt und der für ein Passivhaus gültige Grenzwert von U ≤ 0,15 W/(m²K) somit relativ deutlich unterschritten wurde. Bei der Aufsummierung der einzelnen Schichtdicken wird für die Außenwand ein Wert von 55 cm erreicht. Im Vergleich mit üblichen Ein- und Mehrfamilienhäusern stellt dies den oberen Bereich dar.

Bewertung der Feuchte nach Glaser

Die Untersuchung einer möglichen Feuchteentwicklung in dem zu betrachtenden Wandquerschnitt soll mit Hilfe des Glaser-Verfahrens erfolgen. Unter Annahme von stationären Randbedingungen werden für jede Schicht des Wandquerschnittes die dort anliegende Temperatur und der Sättigungsdruck berechnet, die in der nachfolgenden Übersicht aufgelistet sind.

Tabelle 3: Temperatur & Sättigungsdrücke des Wandquerschnittes

Schicht j	Rj [(m²K)/W]	Temperatur θj [°C]	Sättigungsdruck psj [Pa]	Partialdruck pi [Pa]	Summe sd [m]
1. Innenraum	-	20	2340	1170	0,00
2. Wärmeübergang	0,13	19,5	2268		0,00
3. Anhydrit	0,05	19,3	2241		0,90
4. Brettsperrholz	1,54	13,5	1548		5,90
5. Holzfaserdämm-platte	6,22	-9,8	264		7,30
6. Kalk-Zement-Putz	0,01	-9,8	264		7,45
7. Wärmeübergang	0,04	-10,0	260	208	

Zur besseren Veranschaulichung und Beurteilung der Entstehung und Lage eines Taupunktes im Wandquerschnitt werden die zuvor ermittelten Werte des Sättigungsdruckes und der zugehörigen Wasserdampfdiffusionsäquivalente s_D in einem Diagramm aufgetragen.

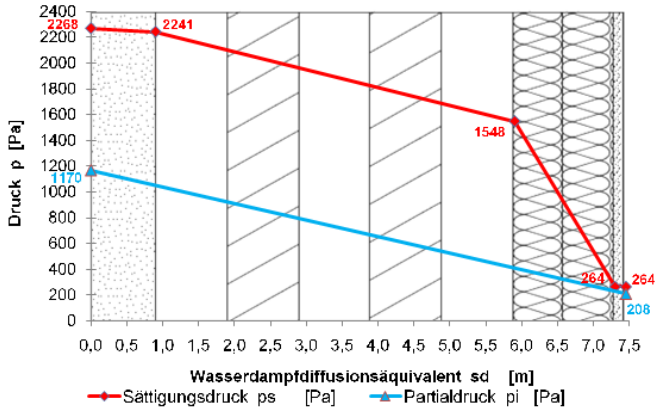


Abbildung 25: Glaser-Diagramm des Wandquerschnittes

Daraus ergibt sich die Erkenntnis, dass der Verlauf des Sättigungsdruckes an keiner Stelle den des Partialdruckes schneidet. Aufgrund dessen kann die Entstehung eines Taupunktes weitestgehend ausgeschlossen werden. Anhand der ermittelten Werte zeigt sich, dass innerhalb der Anhydritschicht der Sättigungsdruck nur geringfügig abnimmt, weshalb man davon ausgehen kann, dass diese Schicht vergleichsweise viel Wasserdampf, sprich Feuchte aus der Raumluft speichern kann. Des Weiteren ist auf der Ordinate abzulesen, dass die Summe der einzelnen Wandschichten den gleichen Wasserdampfdiffusionswiderstand besitzt, wie eine 7,45 m dicke Luftschicht. Hinsichtlich dieser recht beachtlich anmutenden äquivalenten Luftschichtdicke ist ableitbar, dass es sich um einen weitestgehend diffusionsoffenen Wandaufbau handelt.
Die Abbildung 26 stellt den Verlauf der Temperaturen, die zur Ermittlung der Sättigungsdrücke berechnet wurden, in Abhängigkeit von der Wandstärke dar. Das Diagramm zeigt, dass die Temperaturen bis zur Außenoberfläche des Brettsperrholzes noch relativ hoch sind. Die Ursache dafür liegt größtenteils an der außenseitigen Wärmedämmung, welche die Wärme im Gebäudeinneren hält. Dieser Sachverhalt begünstigt, dass sowohl die Anhydritschicht als auch das Brettsperrholz viel Wärme aus den Innenräumen speichern kann. Infolge dessen können hohe Innenwandoberflächentemperaturen erreicht werden, die wiederum zu einem ausgezeichneten Behaglichkeitsgefühl beitragen. Der geringe Temperaturabfall von gerade einmal 0,2 K innerhalb der Anhydritputzschicht zeigt, dass diese in der Lage ist, viel Wärme aus dem Innenraum aufnehmen und zu speichern.

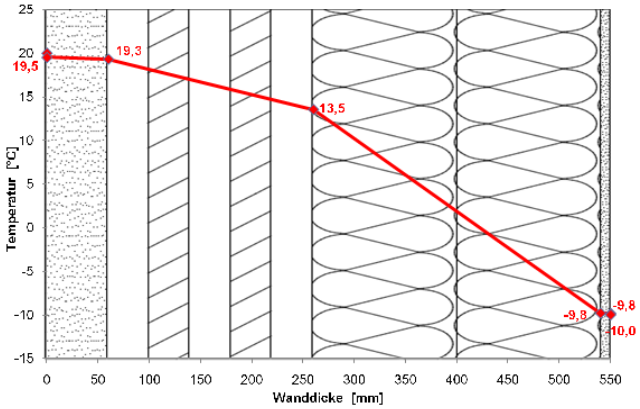


Abbildung 26: Temperaturverlauf des Wandquerschnittes

Überprüfung der Standardberechnung mit Simulationsprogramm

Die Berechnungen des Glaser-Verfahrens beruhen ausschließlich auf stationären Randbedingungen, die nur theoretisch erreicht werden. Um für den gewählten Wandaufbau realistische Ergebnisse erhalten zu können, werden im Folgenden die vorherigen Berechnungen mit dem nummerischen Simulationsprogramm Delphin erneut durchgeführt. Mit Hilfe dieses Rechenprogrammes ist es nun möglich, auch die instationären Klimabedingungen in die Berechnungen einfließen zu lassen. Instationäre Verhältnisse besagen, dass die Eigenschaften der verwendeten Materialien sowie deren bauphysikalische Kennwerte in Abhängigkeit von der Zeit zu betrachten sind, also über ein bestimmtes Zeitintervall simuliert werden. Das bedeutet übers Jahr gesehen, dass die jahreszeitenbezogenen klimatischen Verhältnisse beziehungsweise die Erwärmungs- und Abkühlungsabläufe auf Basis von reellen Wetteraufzeichnungen berücksichtigt werden.

Eingaben & Zuweisungen

Der erste Schritt beinhaltet die Eingabe der Anzahl und Stärke des Schichtenaufbaus der zu untersuchenden Konstruktion. Danach werden die im Wandquerschnitt enthaltenen Baustoffe aus den programminternen Materialdatenbanken herausgesucht und der jeweiligen Schicht zugewiesen. Bis auf die Werte der Wärmeleitfähigkeit und des Wasserdampfdiffusionswiderstandes sind die materialspezifischen Eigenschaften übernommen worden. Diese Veränderung diente ausschließlich der Angleichung an die Baustoffkennwerte, die bereits im Glaser-Verfahren angesetzt wurden, sodass die Möglichkeit eines direkten Vergleiches gewahrt wird. In der nun folgenden Tabelle sind die einzelnen Baustoffe mit ihren Kennwerten zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4: zugewiesene Materialien und deren Eigenschaften

Material	englische Bezeichnung	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	Dichte ρ [kg/m³]	spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]
Anhydrit	floating floor screed	1,2	15	2057,5	850
Brettsperrholz	spruce SW_Fi across grain	0,13	25	528,296	2000
Holzfaser-Dämmplatten	wood fibre insulation board	0,045	5	155	2000
Kalk-Zement-Putz	lime cement plaster	1	15	1800	1050

Für eine realitätsgetreue Simulation müssen diverse Randbedingungen aufgestellt werden, deshalb kommt es hier vor allem auf die Wahl der Klimabedingungen an. Um eine instationäre Berechnung korrekt durchführen zu können, werden sowohl für innen als auch für außen keine konstanten klimatischen Verhältnisse angenommen. Aufgrund der tageszeitabhängigen Temperatur- und Feuchteschwankungen der Innenluft werden diese beiden Faktoren als Sinus-Funktion mit einer Periodendauer von einem Tag charakterisiert. Hierbei wird eine mittlere Temperatur von 19°C festgelegt, die je nach Tageszeit mit einer Amplitude von 4 K variiert. Da auch die relative Luftfeuchte im Laufe eines Tages nicht unverändert bleibt, soll davon ausgegangen werden, dass sie mit einer Amplitude von 10 % um einen Mittelwert von 50 % schwankt. Zur Veranschaulichung der beiden Kurvenverläufe soll die Abbildung 27 dienen.

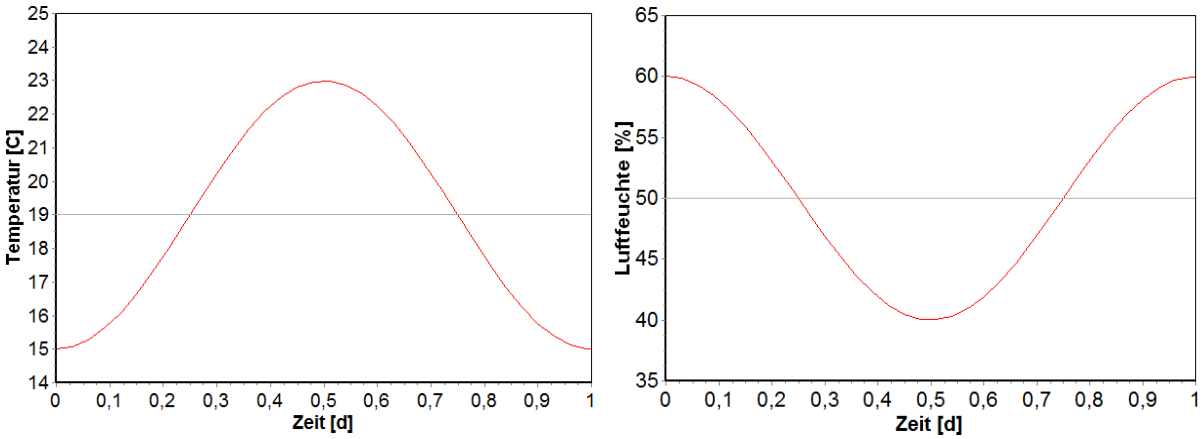


Abbildung 27: Gangkurven des Innenraumklimas

Neben der Bestimmung des Innenklimas ist es unbedingt erforderlich auch ein zeitabhängiges Außenklima zu definieren das dem in der Praxis nahe kommen soll. Auf Grundlage von jährlichen meteorologischen Messdaten enthält die im Delphin-Programm integrierte Klimadatenbank verschiedene nationale und auch internationale Referenzklimadaten. Die Temperatur- und Luftfeuchtedaten für den mitteldeutschen Raum werden durch die Stadt Essen repräsentiert und sind als Funktionswerte in den beiden nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 28) dargestellt.

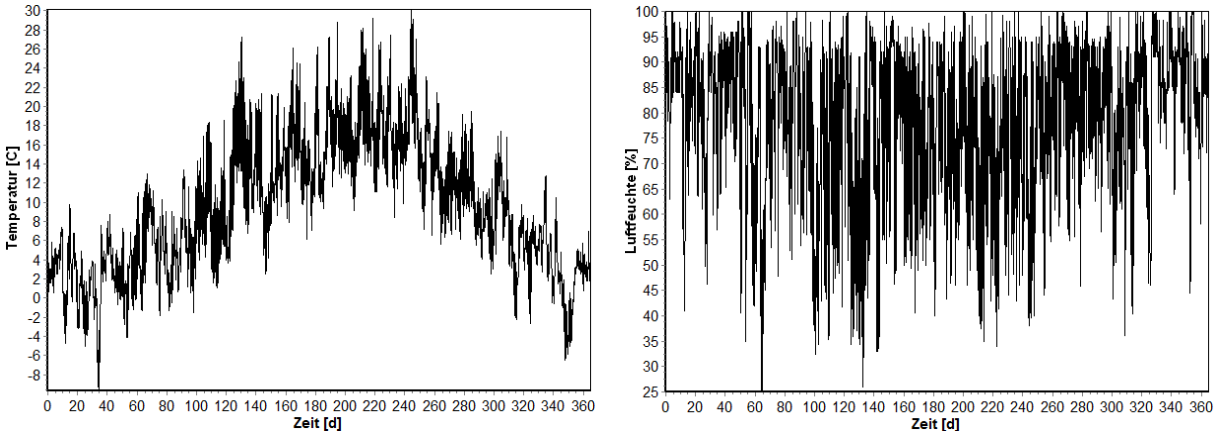


Abbildung 28: Klimakurven des Außenklimas der Stadt Essen

Anhand des Temperaturverlaufes ist erkennbar, an welchen Tagen im Jahr der kälteste und der heißeste Tag ist. Die niedrigste Temperatur wurde am 34. Tag und die höchste Temperatur am 244. Tag des Jahres aufgezeichnet. Nachdem die Klimabedingungen des Außen- und Innenklimas ausgewählt wurden, werden sie der jeweiligen Konstruktionsschicht zuge-

ordnet. Des Weiteren ist für eine derartige Simulation ebenfalls der Einbauzustand zu berücksichtigen. Diesbezüglich müssen sogenannte Initial- oder Ausgangsbedingungen aufgestellt werden.

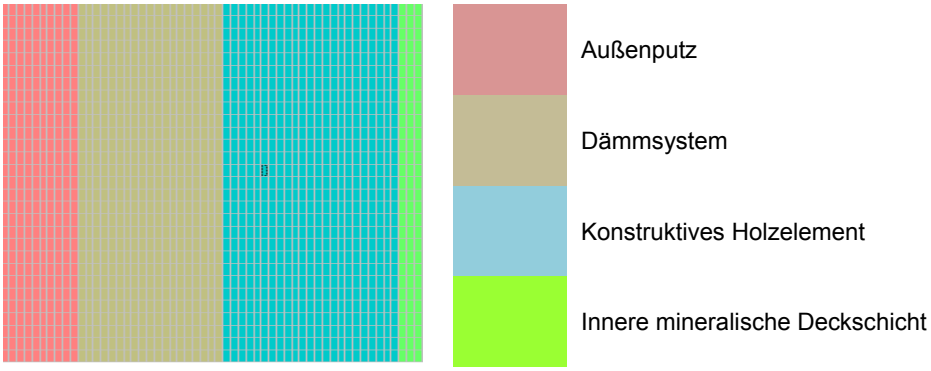


Abbildung 29: Diskretisierung des Wandquerschnittes

Nachdem die Eingabe und Zuweisung aller Materialien und angreifenden Rand- bzw. Klimabedingungen ausgeführt wurden, ist es erforderlich, eine Diskretisierung der eingegebenen Konstruktion durchzuführen. Dies bedeutet, dass jede Schicht in ein Gitternetz unterteilt wird, wobei die jeweils äußeren Randelemente sehr schmal sind und mit zunehmender Schichtdicke im Innenbereich immer größer werden. Mit Hilfe dieser Rasteraufteilung ist das Simulationsprogramm Delphin nun in der Lage, die zugewiesenen Parameter für jedes einzelne Element zu berechnen, so dass sich im Endeffekt eine detaillierte Simulation über einen definierten Zeitraum ergibt.
Die Untersuchung dieses Wandquerschnittes wurde für eine Simulationsdauer von einem Jahr (365 Tage, von Anfang Januar bis Ende Dezember) betrachtet.

Auswertung des Temperaturprofils
Nach der Beendigung der Simulation bestanden verschiedenste Möglichkeiten, die errechneten Werte grafisch darzustellen. Eine Variante der Ergebnisausgabe ist unter anderem der Temperatur-Farbverlauf über die Dicke des gewählten Wandquerschnittes. Infolge der vorherigen Klimadatenauswertung für den Standort Essen ist in der nachfolgenden Abbildung 30 der Temperaturverlauf sowohl für den kältesten (34. Tag), als auch für den wärmsten (244. Tag) Tag des Jahres farblich abgebildet.

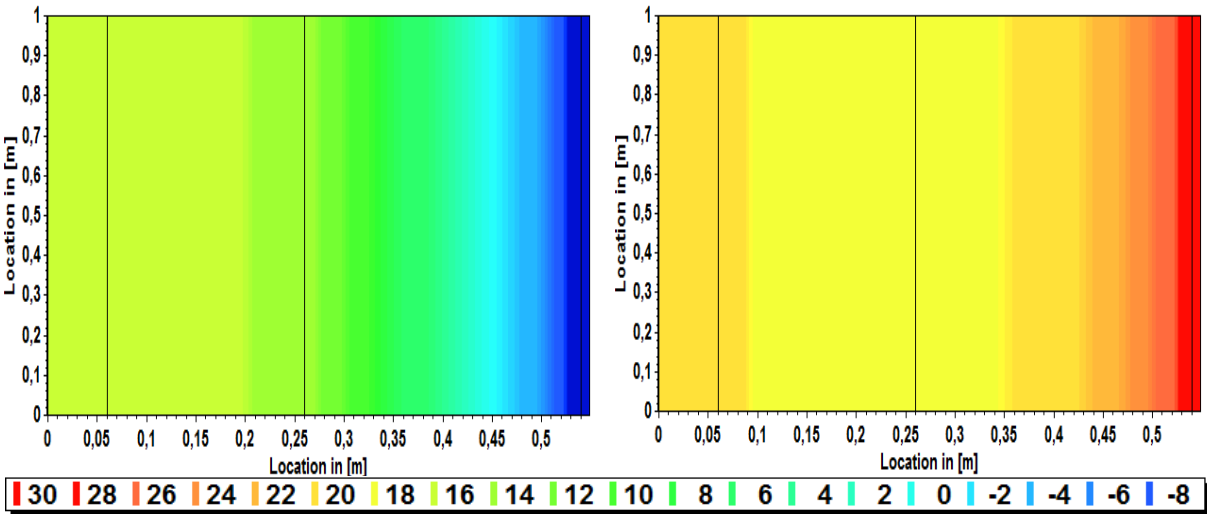


Abbildung 30: Temperaturverlauf für 34. (links) und 244. Tag (rechts)

In Anbetracht der Tatsache, dass Delphin die Ausgabedateien in einem stündlichen Ausgaberaster errechnet hat, können die ermittelten Temperaturen für jede Stunde in einer Tabelle abgelesen werden. Hinsichtlich dessen könnten nun für die äußerste Schicht (Kalk-Zement-Außenputz) die Zeitpunkte der minimalen (821. Stunde = 34,2 Tage) und maximalen Temperatur (5872. h = 244,67 Tage) des simulierten Jahres genauestens herausgefiltert werden. Dies ist notwendig, um die Ergebnisse der Simulation mit denen aus dem Glaser-Verfahren vergleichen zu können.
In beiden Grafiken sind die schichtspezifischen Temperaturen eines einen Meter breiten Wandstreifens über dessen Querschnittsdicke farblich gekennzeichnet. Auf der Oberfläche des Kalk-Zement-Außenputzes wurde am kältesten Tag eine Temperatur von rund -10°C und am heißesten Tag circa 30°C ermittelt. Weiterhin konnte simuliert werden, dass am 34. Tag die Temperatur auf der Innenoberfläche der Anhydritschicht ca. 17°C betrug. Bezogen auf den zu Beginn angenommen Mittelwert der Innentemperatur von 19°C ergibt sich somit eine Differenz von 2 K. Im Vergleich zu den stationären Bedingungen des Glaser-Verfahrens, bei dem im Innenraum konstante 20°C vorherrschen, wurde eine Oberflächentemperatur von 19,5°C errechnet, sodass hier eine Differenz von gerade einmal 0,5 K vorliegen. Das nachfolgende Diagramm (vgl. Abbildung 31) zeigt den Temperaturverlauf, in Abhängigkeit von der Bauteildicke. Die Grundlage hierfür bilden die Ergebnisse der beiden Berechnungsmethoden zum Zeitpunkt des kältesten Tages.

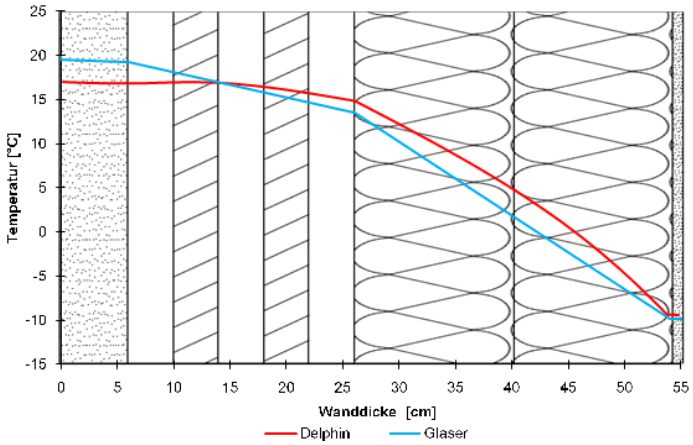


Abbildung 31: Vergleich der Temperaturverläufe nach Delphin & Glaser

Es zeigt sich, dass infolge der stationären Betrachtungsweise des Glaser-Verfahrens die Temperaturen auf der innersten Schicht (Anhydrit) deutlich höher sind, als die aus der Simulation. Weiterhin ist zu sehen, dass in Bereich des Brettsperrholz-Wandelementes das Temperaturgefälle nach Delphin in entgegengesetzte Richtung zeigt. Im Gegensatz zum Verlauf nach Glaser sinkt die Temperatur nicht, sondern steigt noch einmal leicht an. Eine mögliche Ursache dafür wäre die bei der Simulation berücksichtige Speicherfähigkeit der Materialien. Dies würde bedeuten, dass das Brettsperrholz zu diesem Zeitpunkt eine gewisse Wärmemenge aus der Raumluft aufgenommen und gespeichert hat.

Abschließend lässt sich feststellen, dass sich der berechnete Temperaturverlauf, auf Basis des Glaser-Verfahrens, gegenüber dem aus der Delphin-Simulation nicht grundsätzlich unterscheidet. Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine nummerische Überprüfung eines erfüllten Nachweises nach Glaser kein grundlegend differenziertes Ergebnis hervorbringt. Ein solches Simulationsgrammes dient vorrangig einer detaillierteren klimatischen Untersuchung bei besonders anspruchsvollen Konstruktionen.

2.5 Nachhaltigkeit der eingesetzten Baustoffe

2.5.1 Einleitung

Im Zuge der Klimaschutzdiskussionen und vor dem Hintergrund der sich schon zum heutigen Zeitpunkt beginnenden Klimaveränderung durch eine große Anzahl menschlicher Einflüsse wächst die Bedeutung von nachhaltigen und ökologischen Baustoffen für den Einsatz im Gebäudebau stark an. Nur durch den konsequenten Einsatz von natürlichen Baustoffen, welche möglichst auch zusätzlich energie- und damit umweltschonend abgebaut und aufbereitet wurden, können signifikante Veränderungen erreicht werden. Wenn dazu, wie im vorliegenden Fall, die Kombination verschiedener Baustoffe auch zu innovativen Hybridbauteilen führt, sollte trotzdem auch in Zeitfenstern von Lebenszyklen gedacht werden. Der damit verbundene Rückbau von Baustoffen und Bauelementen stellt diesbezüglich eine Herausforderung dar, welche in diesem Kapitel näher betrachtet werden soll. Zuerst werden Zyklierungswege aufgezeigt und die stofflich-qualitativen Energieströme bzw. die Kosten miteinander verglichen. Dabei wird auf die Arbeitsschritte Abbruch, Aufbereitung und Transport des hybriden Verbundbauteils bis zum weiterverarbeitenden Werk eingegangen. Nach einem Überblick der Wiederverwendungsmöglichkeiten erfolgt eine Einordnung mit herkömmlichen Baustoffen.

2.5.2 Recycling

Grundsätzlich sollte bei den vorliegenden Elementen eine Unterscheidung in Holzwerkstoffe und Deckschichten vorgenommen werden, da andere Gerätschaften für das Recycling zum Einsatz kommen. Es können mechanische oder hydraulische Holzscheren, hydraulische Holzspalter und Holzfräsen Anwendung finden. Mechanische Scheren werden als Ergänzung für Abbruchgreifer angewandt, wenn der Holzanteil des abzureißenden Bauteils gering ist. Dabei werden Schneidkräfte in Höhe von 100-200 kN aufgebracht. Hydraulische Holzscheren werden dagegen vorrangig bei Großmengen und beträchtlichen Holzquerschnitten eingesetzt. Sie arbeiten dabei mit 300-900 kN Scherkraft. Holzspalter trennen das Holz bei gleichzeitiger Auffaserung, wobei kleinstückige Holzteile entstehen. Diese Abbruchvariante wird jedoch nur bei kleinen Abbruchaufgaben angewandt und weist deshalb nur geringe Scherkräfte auf. Hydraulische Holzspalter mit ähnlichen geringen Scherkräften werden vor allem bei Mischbauweisen mit überwiegendem Holzanteil eingesetzt.
Holzfräsen schreddern die anfallenden Holzbauteile, so dass diese für eine thermische Verwertung direkt geeignet sind. Die Fräskraft liegt bei 8-15 kN. Die durchschnittliche Leistung der Holzbearbeitungsgeräte beträgt 8-14 m^3/h, je nach eingesetztem Gerät. [LK04], [Hol99]

Um das Holz auf die notwendige Größe zu zerkleinern, kommen wiederum Walzenbrecher, Hammerbrecher, Hacker und andere Geräte zum Einsatz. Je nach Verwertungsweg durchläuft das Holz im Anschluss an den Abbruch eine ein- oder zweistufige Verwertungsanlage. Für eine grobe Aufbereitung genügt eine einstufige Anlage, wohingegen eine zweistufige Anlage zum Einsatz kommt, wenn verarbeitungsfähige Späne hergestellt werden sollen. Für die einstufige Zerkleinerung werden langsam laufende Brecher (z. B. Walzenbrecher, bis zu 500 t/h oder Schredder bis zu 150 t/h) eingesetzt. Diese zerkleinern das Holz, indem Scher- und Biegebeanspruchungen auf das Holz ausgeübt werden. Somit wird das Holz längs und quer zum Faserverlauf zerkleinert. Bei der zweistufigen Zerkleinerung kommen zunächst ebenfalls langsam laufende Brecher zum Einsatz, woraufhin sich schnelllaufende Hammermühlen (200 t/h Durchsatz) für die Feinzerkleinerung anschließen.

Da es in der Praxis nur in seltenen Fällen vorkommt, dass ein abgebrochenes Holzbauteil in sortenreiner Form vorliegt, muss an den Zerkleinerungsprozess ein Sortierprozess angeschlossen werden. Dabei werden alle Störstoffe entfernt und die zerkleinerten Holzspäne können nach Spangröße sortiert werden. Zur Anwendung kommen bspw. Kreisschwing-

siebmaschinen (1000 m^3/h Durchsatz bei 2 kW Leistung pro m^2 Siebfläche) oder Trommelsiebe (120 m^3/h Durchsatz und max. 54 kW Leistung). Zusätzlich werden Magnetabscheider eingesetzt, um metallische Störstoffe zu entfernen. Auch manuelles Sortieren kann in speziellen Fällen zum Einsatz kommen, um Störstoffe auszusortieren.
Im Fall des hierbei vorhandenen hybriden Verbundelements ist es deshalb notwendig, sich nicht nur mit dem Baustoff Holz zu beschäftigen, sondern auch mit den vorhandenen Aluminiumnägeln und der angrenzenden mineralischen Deckschicht aus Anhydrit. Das Wärmedämmverbundsystem ist in die Überlegungen ebenfalls einzubeziehen. Vereinfachend wirkt sich der schlichte Aufbau des Holzelementes aus – die Verbindung der einzelnen Brettlagen erfolgt lediglich durch die Aluminium-Rillennägel und ohne die Verwendung von Klebstoffen. Bei der Entsorgung von Probekörpern konnte sich auch im Rahmen des Forschungsprojektes ein Bild über die Trennung der einzelnen Werkstoffe gemacht werden. So war beim Lösen der mineralischen Deckschicht zwar ein nicht unerheblicher Arbeitsaufwand notwendig, was allerdings mit der rein manuellen respektive händischen Trennung zu erklären war. Unter Zuhilfenahme von technischen Geräten dürften keinerlei Probleme auftreten. In Abbildung 32 und Abbildung 33 ist die Trennung bzw. auch der sehr gute Verbund der jeweiligen Baustoffe erkennbar.

Abbildung 32: Trennung der Baustoffe nach Versuch

Abbildung 33: Detail direkte Verbundzone Deckschicht auf Holz

Um den Baustoff Holz wiederverwenden bzw. -verwerten zu können, muss das Holz in unterschiedliche Qualitätskategorien eingeteilt werden. Dabei werden die in Abbildung 34 aufgeführten Altholzkategorien unterschieden.

Altholzkategorie AI	• Naturbelassenes, oder lediglich mechanisch berbeitetes Altholz
Altholzkategorie AII	• Verleimtes, gestrichenes, bechichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz - ohne halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel
Altholzkategorie AIII	• Verleimtes, gestrichenes, bechichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz - mit halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und ohne Holzschutzmittel
Altholzkategorie AVI	• Verleimtes, gestrichenes, bechichtetes, lackiertes oder anderweitig behandeltes Altholz - mit halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung und mit Holzschutzmittel

Abbildung 34: Altholzkategorien

Der Holzteil des hybriden Verbundelements kann somit in die Kategorie der naturbelassenen Gebrauchthölzer eingeordnet werden und fällt damit in die Altholzkategorie I.
Die mineralische Deckschicht auf Anhydritbasis besteht chemisch gesehen aus kristallwasserfreiem Calciumsulfat ($CaSO_4$). Es kommt natürlich vor, kann aber auch synthetisch hergestellt werden. Brennt man abgebundenen Gips ($CaSO_4 \times 2\ H_2O$) bei Temperaturen um die 900-1000°C, wird Anhydrit hergestellt, indem das gebundene Kristallwasser ausgetragen wird. Dieser Prozess soll bei der Aufbereitung der mineralischen Deckschicht auf Anhydritbasis zum Tragen kommen. Der störstofffrei aufbereitete Anhydrit kann somit gemahlen und gebrannt als neuer Rohstoff für die Gips- bzw. Anhydritherstellung verwendet werden. Damit dient der aufbereitete Sekundärrohstoff dazu, Gipsplatten, Baugips, Gipsputz, Anhydritestrich oder Gipsestrich herzustellen. Die Wertschöpfungskette bleibt somit erhalten.

Das Wärmedämmverbundsystem soll manuell vor dem jeweiligen Abbruchprozess entfernt werden und anschließend an den Hersteller zurückgeführt werden. Dieser kann bspw. enthaltene Mineralwolle aus dem gebrauchten WDVS entnehmen und als Rohstoff in einem neuen System verarbeiten. Nachfolgend soll das hybride Verbundelement auf seine verschiedenen Recyclingmöglichkeiten untersucht werden. Dafür werden je nach Wieder- bzw. Weiterverwendung verschiedene Abbruch-, Aufbereitungs- und Wiederverwendungsmöglichkeiten aufgezeigt. In dieser Arbeit werden nur mobile Anlagen betrachtet, da deren Anwendung problemlos auf stationäre Anlagen übertragen werden kann. Die durchschnittlichen Energieströme werden dabei unter Zuhilfenahme der Baugeräteliste [Bau07] und [HK06] angegeben. [Koh97], [BH95], [Gew98]

2.5.3 Wiederverwendung der Hybriden Elemente

Unter der Bauteilwiederverwendung versteht sich die an den Recyclingprozess anschließende weitere Verwendung der Elemente bzw. Materialien. Im Fall der hybriden Verbundbauteile kann darunter einerseits die weitere Nutzung der Elemente gesehen werden (Wiederverwendung), aber auch die Trennung der Materialien und die jeweilige Weiterverarbeitung der Baustoffe ist möglich (stoffliche Verwertung). Da das Holz (Altholzkategorie I) und die mineralische Deckschicht des hybriden Verbundelements vollkommen naturbelassen sind und somit frei von Schadstoffen, kann eine stoffliche Verwertung problemlos an die Nutzungszeit des Holzbauteils angeschlossen werden.

Im Folgenden ist eine kurze Gesamtübersicht der möglichen Wiederverwendungen bzw. der stofflichen Verwertung aufgestellt, welche im Anschluss noch näher erläutert werden:

A) Wiederverwendung als Bauelement
B) Spanplattenherstellung (stoffliche Verwertung)
C) Einsatz in der Landwirtschaft (stoffliche Verwertung)
D) Thermische Verwertung (stoffliche Verwertung)
E) Entsorgung

A) Wiederverwendung als Bauelement

Bei der Bauteilwiederverwendung sollten zunächst sämtliche elementübergreifende Bekleidungen oder Beplankungen, wie z. B. WDVS-Systeme entfernt werden. Das WDVS kann an den Hersteller zurückgeführt werden, um Teile des Verbundsystems, wie bspw. Mineralwolle, wiederzuverwenden. Die mineralische Deckschicht kann unter Zuhilfenahme entsprechender Geräte, wie z. B. Presslufthämmern, entfernt, abtransportiert und von Fachbetrieben aufbereitet werden. Daran anschließend ist die weitere Zerkleinerung in transportable Elementgrößen für den Weitertransport an den neuen Bestimmungsort vorzusehen. Unter Einbeziehung von Anpassungsarbeiten und Ergänzungsbauteilen sind die Elemente damit neu einzubauen. Bis zu entsprechenden Toleranzen sind kleinere Beschädigungen beim Abbau bzw. Transport tolerabel, da beidseitig eine Verkleidung respektive die mineralische Deckschicht die Luftdichtheit wie auch den Oberflächenausgleich samt Oberflächenfinish darstellt.
In Anhang 12 ist das schrittweise Vorgehen aufgeführt, um das hybride Bauteil so rückzubauen, dass dessen Wiederverwendung möglich ist. Anhang 13 gibt die Arbeitsschritte, Leistungsströme und Kosten an. Dabei werden alle Angaben ganzzahlig gerundet dargestellt.

B) Spanplattenherstellung (stoffliche Verwertung)

Für die Spanplattenherstellung ist es absolut notwendig, dass das zu verwendende Holz unbehandelt und frei von biologischen bzw. mikrobiellen Einflüssen ist. Das unbehandelte Holz der hybriden Verbundelemente eignet sich somit hervorragend zur Wiederverwendung in der Spanplattenindustrie. [Koc97]
Analog wie bei der stofflichen Verwertung zur Spanplattenherstellung müssen natürlich auch die äußeren und inneren Bekleidungen entfernt werden. Bei der Vorgehensweise kann dabei allerdings auch etwas weniger vorsichtig umgegangen werden, um Zeit einzusparen. So ist die Zerlegung mittels Hydraulikbagger inklusive hydraulischem Holzspalter möglich. In einer einstufigen Aufbereitungsanlage wird der Holzanteil im Spanplattenwerk zusammen mit anderen von extern angelieferten Holzanteilen auf eine einheitliche Größe von ca. 5-50 mm weiterzerfasert. [Koh97]
Das aufgegebene Material wird während der Aufbereitung im ersten Schritt zerkleinert, wonach im zweiten Schritt alle Störstoffe aussortiert bzw. alle Fraktionen sortenrein getrennt werden. Zu unterscheiden ist dabei die metallische Fraktion, die wiederum aus einem magnetischen Anteil (Schrauben, je nach Herstellungsart metallische Putzschienen) und einem nicht magnetischen Anteil (Aluminiumnägel) besteht sowie einer mineralischen Fraktion (Deckschicht auf Anhydritbasis bzw. deren Reste). Während der Zerkleinerung in dem Walzenbrecher wird die spröde mineralische Deckschicht durch die einwirkenden Kräfte vom elastischeren Holzteil getrennt und dabei zerkleinert. In der darauffolgenden Sortierung wird die mineralische Fraktion als Feinanteil vom faserigen, plattenförmigen Holzanteil über ein Kreisschwingsieb abgetrennt. Die mineralische Fraktion wird direkt mit der Abscheidung in einen bereitgestellten Container verfrachtet und anschließend zu weiterverarbeitenden Betrieben transportiert. Die Holzschnitzel haben nach der Zerkleinerung eine Größe von ca. 150 mm. Über ein Förderband wird die magnetische Fraktion von einem Überbandmetallabscheider aussortiert, wobei die metallische, nicht magnetische Fraktion zusammen mit der

hölzernen Fraktion zum Windsichter transportiert wird. Im letzten Schritt der Sortieranlage werden die nicht magnetischen Aluminiumnägel durch einen Querstromwindsichter vom Holzteil getrennt. Dabei werden die unterschiedlichen Materialdichten herangezogen. Holz (je nach Holzsorte ∂ = ca. 0,5g/cm^3) hat eine wesentlich geringere Dichte als Aluminium (∂ = 2,7g/cm^3) und kann deswegen leicht über einen Windsichter abgeschieden werden. Die abgetrennten und sortierten Fraktionen können dann je nach Stoffart weiterverarbeitet werden. [Mül11], [Nic96]
Das zugehörige Fließschema (Anhang 14) und die aufzubringenden Kosten und Leistungsströme können Anhang 15 entnommen werden.

C) Einsatz in der Landwirtschaft (stoffliche Verwertung)

Eine weitere Möglichkeit, das hybride Verbundelement stofflich zu verwerten, besteht darin, sowohl den Holz- als auch den Anhydritanteil des Verbundbauteils in der Landwirtschaft einzusetzen. Der Holzanteil eignet sich durch seine Altholzkategorie I hervorragend für Kompostierzwecke, um Humussubstrate herzustellen oder als direkte Zugabe zu nährstoffarmen Böden in Form von Mulch.
Das Calciumsulfat der mineralischen Deckschicht kann als Dünger Anwendung finden, da viele Pflanzen auf diesen Nährstoff angewiesen sind. Ebenso kann Calciumsulfat zur Bodenauflockerung genutzt oder zu Kompostierprozessen hinzugefügt werden. Somit können die natürlichen Materialien des hybriden Verbundbauteils nach ihrer Nutzungszeit durch Aufbereitungsprozesse direkt dem natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden.

Der Verfahrensprozess ist in Anhang 16 dargestellt. Dabei gleicht der Abbruchprozess dem der Spanplattenherstellung. Ein einstufiger Aufbereitungsprozess ist für den Materialeinsatz in der Landwirtschaft jedoch nicht ausreichend. Um einsatzfähige Sekundärrohstoffe herzustellen, benötigt man einen zweistufigen Aufbereitungsprozess. Hierfür wird der einstufige Aufbereitungsprozess um einen Zerkleinerungsprozess mit der Hammermühle erweitert. Die Fraktionen werden dadurch auf Größen unter 10 mm zerkleinert. Man sollte Mühlenmodelle wählen, deren Zerkleinerungsprozess Spangrößen um die 50 mm Länge herstellen kann, da diese Größe als optimal für die Kompostierung gilt. Über ein Förderband mit Magnetabscheider und einem Querstromsichter werden die einzelnen Fraktionen getrennt. Das Calciumsulfat und die Hackschnitzel werden über einen Dosierschieber in bereitstehende Container gefüllt, um sie dann direkt an umliegende landwirtschaftliche Betriebe zu verkaufen. Die für diese Anwendung anfallenden Leistungen und Kosten können Anhang 17 entnommen werden. [Koh97], [Bau07]

D) Thermische Verwertung (stoffliche Verwertung)

Bei der thermischen Verwertung können neben unbehandelten auch behandelte Hölzer verwendet werden, was bei dem vorliegenden hybriden Verbundelement allerdings gar nicht notwendig ist. Eine thermische Verwertung kann entweder in einer Kraftwerkanlage, der Zementindustrie oder einem Biomasseheizkraftwerk erfolgen.

Kraftwerkanlage

Ziel einer Verbrennung in Kraftwerksanlagen ist die Energiegewinnung. Zur vollständigen Verbrennung von Holz sind hohe Temperaturen und eine ausreichende Verweildauer in der Anlage nötig. In Anbetracht der Aufbereitungsmöglichkeiten des hybriden Verbundelementes und der daraus resultierenden Spangröße von < 60 mm erscheint eine Wirbelschichtfeuerung als Verbrennungsanlage am geeignetsten. Als Abbruch- und Aufbereitungsprozess kommt deshalb das im Abschnitt „Einsatz in der Landwirtschaft“ dieses Kapitels vorgestellte Verwertungskonzept in Form einer zweistufigen Aufbereitung zum Einsatz. Das Fließschema sowie alle Kosten und Leitungsströme können somit Anhang 16 und Anhang 17 entnommen werden. [Mar10]

Zementindustrie

Die zur Zementherstellung benötigten hohen Temperaturen von ca. 1450°C benötigen eine Flammtemperatur von ca. 2000°C. Die Drehrohröfen dieses Industriezweiges sind sog. „Allesfresser“. So können fossile Brennstoffe durch Sekundärbrennstoffe wie Altholz, Altreifen, Klärschlamm, Kunststoff- sowie Produktions- und Gewerbeabfälle u.a. ersetzt werden. Diese Tatsache wirkt sich positiv auf die thermische Verwertung des hybriden Verbundbauteils aus. Bei der Wirbelschichtfeuerung liegt die Obergrenze des Inertiengehaltes bei max. 20 %. Der Inertiengehalt umfasst im Fall des hybriden Verbundbauteils die mineralische Deckschicht und die metallischen Bestandteile. Da der Aluminiumanteil mit 0,04 % und die Stahlschrauben einen vernachlässigbar kleinen Anteil im hybriden Verbundbauteil ausmachen, ist es möglich, das komplette Wandelement inklusive mineralischer Deckschicht der Befeuerung zuzuführen, ohne kosten- und zeitintensive Sortierprozesse voranstellen zu müssen. Dabei wirkt sich die thermische Zersetzung von Aluminium und der mineralischen Deckschicht auf Anhydritbasis sogar positiv auf den Herstellungsprozess des Zementklinkers aus. Aluminium und Calcium werden beim Verbrennungsprozess in den Klinker eingebunden. Anfallende Reststoffe werden als Asche ausgetragen oder in Filteranlagen abgeschieden. Außerdem ist es möglich, sortenreine Anteile der mineralischen Deckschicht auf Anhydritbasis von anderen Abbruchbaustellen, aufbereitet als Zuschlagstoff, in der Zementindustrie einzusetzen.
Nach der Demontage eines eventuell vorhandenen WDVS können die Elemente per Hydraulikbagger inklusive hydraulischem Holzspalter abgebrochen werden. Das dabei anfallende Material wird in eine Zerkleinerungsanlage gegeben. In der zweistufigen Anlage wird das Verbundelement per Walzenbrecher und Hammermühle auf eine für die Zementindustrie geeignete Größe zerkleinert. Das abgebrochene Material wird direkt in Container verfrachtet und zu umliegenden Zementunternehmen transportiert. Das zugehörige Fließschema kann Anhang 18 sowie die dabei anfallenden Kosten und Energieströme Anhang 19 entnommen werden. [Mar10], [Jas97]

Biomasseheizkraftwerk

Als weiterer Recyclingweg bietet sich die Nutzung des Holzanteils im hybriden Verbundelement als Brennstoff für Biomasseheizkraftwerke an. Dabei wird das Holz als Brennstoff genutzt, um sowohl Energie als auch Wärme zu erzeugen. Der dabei erzeugte Strom wird in das Netz eingespeist, wobei gleichzeitig je nach Heizkraftwerksleistung umliegende Gemeinden, Industrie- und Gewerbeparks von der Fernwärme profitieren. Die bei der Verbrennung des Holzanteils des hybriden Verbundbauteils der Altholzkategorie I anfallende Asche kann problemlos als Düngemittel auf die umliegenden landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden.
Die Aufbereitung geschieht analog dem Verfahren zur Vorbereitung wie für den Einsatz in der Landwirtschaft. Biomasseheizkraftwerke arbeiten ebenfalls mit Wirbelschichtfeuerung, wofür der Holzanteil des hybriden Verbundelements auf eine Größe um die 100 mm zerkleinert werden sollte. Das Verfahrensschema ist in Anhang 16 dargestellt. Die dabei anfallenden Kosten- und Energieströme können in eingesehen werden.
Als Vorteil dieser Kraftwerksanlagen ist die exklusive Nutzung nachwachsender Rohstoffe hervorzuheben. Anders als bei den bereits beschriebenen Kraftwerksanlagen (s.o.), in denen Holz lediglich als Zusatzbrennstoff Anwendung findet, wurden Biomasseheizkraftwerke für den ausschließlichen Gebrauch nachwachsender biogener Rohstoffe entwickelt, um die natürlichen und fossilen Rohstoffe zu schonen.

E) Entsorgung

Eine reine Entsorgung des hybriden Verbundbauteils in Form einer Deponierung ist unzeitgemäß und in der Realität nicht mehr praktikabel, soll allerdings für Vergleichszwecke hier trotzdem kurz aufgeführt werden. Die im hybriden Verbundelement verarbeiteten Baustoffe werden von Entsorgungsbetrieben nicht mehr für eine Deponierung angenommen, da das knappe Deponievolumen für wirklich entsorgungsbedürftige Abfälle aufgespart werden muss.

Trotzdem ist es möglich, ein öffentliches Entsorgungsunternehmen zu beauftragen, um die Materialien des hybriden Verbundbauteiles zu verwerten. Dafür müssen die einzelnen Fraktionen wiederum voneinander getrennt werden. Als Rezyklierungsverfahren wird dabei der dargestellte Prozess für die Spanplattenherstellung angewandt. Das Entsorgungsunternehmen bereitet die Materialien im Anschluss auf und kann sie als Sekundärrohstoffe an verschiedene Abnehmer weiter verkaufen.

Sinnvollster Rezyklierungsweg

Grundsätzlich sollte vor dem Hintergrund der Energieeinsparung, der Ökologie und Nachhaltigkeit immer eine Baustoffauswahl erfolgen, welche mit den Ressourcen schonend umgeht. Dazu zählt auch, dass bei Rückbauten, baulichen Veränderungen oder räumlichen Neuorientierungen im Gebäudebereich so wenig wie möglich Energie aufgewendet werden sollte. Daher ist beim Recycling von hybriden Wandbauteilen so vorzugehen, dass möglichst wenig Energie eingesetzt und somit auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten der Nachhaltigkeitsgedanke voranzustellen ist. Im Abschnitt Wiederverwendung der hybriden Elemente wurde eine Übersicht der Möglichkeiten gegeben und auch eine überschlägliche Berechnung zu den anfallenden Energiemengen und Kosten aufgestellt.
Im Endergebnis sollten die Kosten für die Herstellung eines Sekundärstoffes und damit dessen Verkaufspreis nicht den eines Primärbaustoffeinsatzes überschreiten. Gleiches gilt für die Umweltbelastungen, die während des Recyclings auftreten. Dabei darf das recycelte Material im Vergleich zur Herstellung von Primärbaustoffen nicht negativ auffallen, d.h., die Umweltbelastungen dürfen nicht größer sein, als sie beim Einsatz eines Primärstoffes angefallen wären. Selbst wenn die Kosten- und Energieströme sowie Umweltauswirkungen mit denen eines Primärstoffes gleichgesetzt werden können, hat der Sekundärrohstoff einen nicht einzuholenden Vorteil - für die Herstellung eines Sekundärbaustoffes müssen keine natürlich vorkommenden Rohstoffe eingesetzt, abgebaut und aufbereitet werden. [Nic96]
Vergleicht man die verschiedenen Rezyklierungswege bezüglich ihrer Kosten und Leistungsströme, so kann man Tabelle 5 entnehmen, dass eine Aufbereitung für die thermische Verwertung in der Zementindustrie die geringsten Kosten und gleichzeitig den niedrigsten Energieaufwand verursacht.

Tabelle 5: Leistung und Kosten, Vergleich der Rezyklierungsmöglichkeiten

Verwertung	Rezyklierungsmöglichkeit	Leistung [kW]	Kosten ges. [€/h]
Stoffliche Verwertung	Bauteilwiederverwendung	1525	670
	Spanplattenherstellung	2230	1021
	Einsatz in der Landwirtschaft	2146	1056
Thermische Verwertung	Kraftwerksanlage	2146	1056
	Zementindustrie	1306	632
	Biomassekraftwerk	2146	1056

Dennoch kann durch diese Tatsache nicht pauschal die bestmögliche Rezyklierungsstrategie begründet werden, da ein wichtiger Faktor in Tabelle 5 und ebenfalls in den Tabellen im Anhang (Anhang 11, Anhang 13, Anhang 15, Anhang 17 und Anhang 19) keine bzw. nur unzureichende Beachtung findet. Der nicht betrachtete Faktor ist der Transport, der nötig wird, um das abgebrochene Material zum weiterverarbeitenden Unternehmen zu befördern. Da die Transportentfernung zu den jeweilig weiterverarbeitenden Betrieben immer vom Standort des Abbruchobjektes abhängt, kann dieser Faktor in der Berechnung keine Berücksichtigung finden. Wie aus allen Tabellen zu diesem Abschnitt allerdings deutlich hervorgeht, sind aber immer die Materialtransporte die kosten- und energieintensivsten Positionen. Dies bedeutet, dass vor jedem Recyclingvorhaben im Einzelfall geprüft werden müsste, welche Rezyklie-

rungsstrategie am besten geeignet ist. Allgemein betrachtet sind Transportentfernungen nur bis maximal 25 km wirtschaftlich. Diese Kilometergrenze gilt ebenfalls während der Planung der Entscheidung, ob die Aufbereitung des Bauschutts per mobiler, semimobiler oder stationärer Aufbereitungsanlage durchgeführt werden soll.

Abschließend kann konstatiert werden, dass zwar keine konkrete Empfehlung bezüglich eines Rezyklierungsverfahrens gegeben werden konnte, sondern nur eine exemplarische Auswahl der verschiedenen Rezyklierungswege für das hybride Verbundelement und damit lediglich grobe Anhaltspunkte bezüglich der Energieströme und Kosten dargestellt werden konnten. Allerdings sind sämtliche vorgestellten Verfahren ohne nennenswerte Rest- oder Abfallstoffe gekennzeichnet, was insgesamt den sehr positiven ökologischen Aspekt dieser natürlichen und wohngesunden Bauelemente deutlich hervorhebt.

2.5.4 Vergleich mit herkömmlichen Baustoffen

Um eine wissenschaftlich vergleichbare Analyse anzustellen, muss diese immer zwischen vergleichbaren funktionellen Einheiten (FE) stattfinden. Die FE dient als Bezugseinheit und muss daher eindeutig definiert werden. In dieser Arbeit wird die FE als Wandbauelement im Wohnungsbau definiert. Damit kann ein Vergleich zwischen dem hybriden Verbundelement und dem herkömmlichen Holzrahmenbau sowie Stahlbetonbau angestellt werden. Dieser Vergleich wurde vorgenommen, um die Nachhaltigkeit des hybriden Verbundelements im Vergleich mit gängigen Bauweisen bezüglich des Recyclings zu untersuchen. [GH03]

Holzrahmenbau

Die Wandelemente des Holzrahmenbaus sind Verbundbauteile, die vorrangig als Elemente für den Fertighausbau eingesetzt werden. Sie bestehen aus einem Verbund von Rippen (rechteckige, stabförmige Holzbauteile) und Beplankung (flächiges, plattenförmiges Bauteil aus Holz- oder Gipsbaustoffen). Der Verbund zwischen den Materialien wird durch Nägel oder Klammern sichergestellt. Um eine Rezyklierungsmöglichkeit für die Holzrahmenbauweise aufzuzeigen, wird ein Wandaufbau mit folgenden Materialien betrachtet:

- Holzfaserplatte
- Holzkonstruktion
- Dampfsperre auf Polyethylenbasis
- Stahlprofil
- Stahlnägel
- Dämmung aus Mineralwolle
- Holzschalung
- Putzschicht auf Kalkbasis

Beim Abbruch von Holzrahmenbauwerken können prinzipiell die gleichen Gerätschaften eingesetzt werden, wie sie schon am Kapitelanfang für die Trennung der hybriden Verbundbauteile (Holzbauteile) beschrieben worden sind. Dadurch, dass der Holzanteil beim Holzrahmenbau jedoch wesentlich geringer ist als der Holzanteil des hybriden Verbundelements, ist es ebenso möglich, universelle Abbruchgeräte für allgemeine Abbruchvorhaben einzusetzen. Das zugehörige Fließschema zur Holzrahmenbauweise respektive dessen Abbruch ist im Anhang 20 hinterlegt.
Holzrahmenbauwerke werden per Hydraulikbagger mit Teleskopausleger abgebrochen und der Bauschutt einer Aufbereitungsanlage zugeführt. Im ersten Schritt wird der Bauschutt einer Vorklassierung in Form eines Kreisschwingsiebes unterzogen. Dort werden Korngrößen <100 mm direkt weiter zur Sortierung befördert. Korngrößen über 100 mm werden einer

zweistufigen Zerkleinerungsanlage zugeführt. Über den Prallbrecher und die anschließende Prallmühle werden damit Korngrößen zwischen 5 mm und 100 mm erreicht. Diese Korngröße ist für die anschließende Sortierung notwendig, um die verschiedenen Materialsorten voneinander zu trennen. Die Materialien aus Stahl werden durch den Überbandmagnetscheider aussortiert, in Container verladen und zu weiterverarbeitenden Betrieben transportiert. Das übrige Stoffgemenge wird anschließend über ein Rollrostsieb in einzelne Korngrößen getrennt. Die kleinere Korngrößenfraktion wird somit der Nassstromklassierung zugeführt. Dort werden Holzteile von der mineralischen Fraktion separiert, indem der Holzanteil aufschwimmt und die mineralische Fraktion absinkt. Die klassierten Fraktionen werden sortenrein in Container verladen und abtransportiert. Die für diesen Rückbau anfallenden Kosten und Energieströme können der Tabelle aus Anhang 10 entnommen werden.
Insgesamt benötigen Bauteile des Holzrahmenbaus eine sehr energie- und kostenintensive Rezyklierung, um die Materialien nach ökologischen Gesichtspunkten aufzubereiten. Es werden diverse Zerkleinerungs- und Sortieranlagen benötigt, um die verschiedenen verbauten Materialien voneinander zu lösen und gleichzeitig nach Fraktionen zu trennen.

Stahlbetonbau

Als Spezialgerät für den Rückbau von Stahlbetonbauwerken zählt der sog. Betonbeißer, welcher vorzugsweise für große Betonbauteile eingesetzt wird. Durch überdurchschnittliche Öffnungsweiten und integrierte Schneidbacken eignet sich dieses Werkzeug ideal, um sogar Stahlbeton abzubrechen. Dabei kommen Brechkräfte von 1500-2800 kN zum Einsatz. Der Betonpulverisierer wird nach dem Abbruch eingesetzt, um das bereits abgebrochene Material recyclinggerecht zu zerlegen. Dieses Gerät zerkleinert den Beton bei gleichzeitiger Trennung des Betons von eventuellen Bewährungsstählen unter dem Einsatz von Brechkräften von 400-1700 kN. Pulverisierer existieren auch als hydraulische Variante, um den heutigen Leistungsansprüchen gerecht zu werden. Alle genannten Spezialmaschinen agieren bei dem Abbruchmaterial Beton mit 25-30 m^3/h und bei Stahl je nach Bewährungsanteil mit 12-20 m^3/h. Um den Stahl bearbeiten zu können, sind hohe Schließkräfte notwendig. Zum Einsatz kommen daher mechanische Stahlscheren (750-2500 kN) oder hydraulische Stahl- und Schrottscheren (3000-13000 kN). Somit ist eine Trennung der Materialien gut möglich. Im Schnitt können 6-9 t/h Stahlmaterial abgebrochen werden. Ein passendes Fließschema ist im Anhang 21 abgebildet.
Stahlbetonbauwerke werden mit Hilfe von hydraulischen Betonpulverisierern abgebrochen. Dabei wird eine erste Trennung zwischen dem Bewährungsstahl und dem Beton vorgenommen. Die hydraulische Stahlschere ergänzt den Pulverisierer, indem sie den Bewährungsstahl durchtrennt, damit das abgebrochene Material in aufgabefähigen Stückgrößen vorliegt. Per Hydraulikbagger werden einzeln vorliegende Stahlteile in bereitstehende Container verladen. Der restliche Bauschutt wird der Aufbereitungsanlage zugegeben, wo eine Vorklassierung mittels absieben ansteht. Im nächsten Schritt wird das Material dem Prallbrecher zugeführt, der den spröden Beton von dem elastischen Stahl trennt. Es entstehen Betonkorngrößen von circa 100 mm. Über ein Förderband werden die Stahlknollen durch einen Überbandmagnetscheider von dem zerkleinerten Beton getrennt. Anschließend erfährt der Beton eine Klassierung nach Korngrößen über ein Rollrostsieb. Dort werden die Korngrößen hierarchisch getrennt und in Container verfrachtet. Korngrößen über 100 mm werden dem Prallbrecher erneut zugeführt.
Die dafür aufzuwendenden Energieströme und Kosten sind in der Tabelle in Anhang 11 dargestellt. Die klassierten Betonkorngrößen werden zu Betonaufbereitungsunternehmen transportiert, in denen der abgebrochene Beton weiter aufbereitet wird. Bei der Betonwarenherstellung können 20 % des Zuschlagstoffes durch aufbereiteten Betonsplitt ersetzt werden, wodurch keine nachteilige Beeinflussung der Betoneigenschaften geschieht. [LK04] [Koh97]

Gegenüberstellung mit herkömmlichem Massivbau

Im Vergleich der Rezyklierungswege von herkömmlichen Bauweisen mit dem hybriden Verbundelement ist eine eindeutige Tendenz bezüglich der Energieströme und Kosten zu erkennen. In Tabelle 6 werden die Aufwendungen bezüglich der Energieströme und Kosten der einzelnen Rezyklierungsstrategien zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 6: Leistung und Kosten, Zusammenfassung

Rezyklierungsmöglichkeit	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Hybrides Verbundelement thermische Verwertung Zementindustrie	1306	632
Hybrides Verbundelement stoffliche Verwertung Spanplattenherstellung	2230	1021
Holzrahmenbau	2384	1118
Stahlbeton	2554	1015

Die energetisch und finanziell, damit gleichzeitig auch aus umwelttechnischer Sicht bestmöglichste Methode der Rezyklierung des hybriden Verbundelementes ist die thermische Verwertung des Bauteils in der Zementindustrie. Die unwirtschaftlichste Methode stellt die stoffliche Verwertung des Verbundbauteils für die Spanplattenindustrie dar.
Zum einen ist dies darin begründet, dass das hybride Verbundelement ein leicht zu demontierendes WDVS besitzt, welches zur Aufarbeitung an den Hersteller bzw. an andere Aufbereitungsunternehmen zurückgeführt werden kann. Zum anderen besteht das hybride Verbundelement ausschließlich aus natürlichen, leicht voneinander zu trennenden Materialien. Durch den Verzicht auf zusätzliche Verbindungsstoffe, wie z. B. Netzstrukturen, Haftvermittler, Klebstoffe u. ä., ist eine Zerkleinerung mit anschließend sortenreiner Trennung leicht möglich. Dadurch kann eine Aufbereitung mit wenigen Anlagen durchgeführt werden, wodurch wiederum Kosten und Energie gespart werden. Durch die Naturbelassenheit der verwendeten Rohstoffe des hybriden Verbundelementes ist eine an die Nutzungszeit anschließende Verwertung der einzelnen Stoffe problemlos möglich. Durch die Kategorisierung des Holzanteils in Altholzkategorie I gibt es keine Einschränkung der Verwertungsmöglichkeiten. Gleiches gilt für die mineralische Deckschicht auf Anhydritbasis. Durch die positiven Rezyklierungseigenschaften kann dieses Material mit unwesentlichem energetischem und finanziellem Aufwand wiederverwendet werden. Unter Ausnutzung der Materialeigenschaften lässt sich die mineralische Deckschicht mühelos von dem Holzanteil trennen. Die zum Verbund beitragenden Aluminiumnägel sowie die verarbeiteten Stahlschrauben sind dabei ebenfalls mit einer hohen Trennschärfe auszusortieren.

Obwohl zwei verschiedene Herstellungsmöglichkeiten des hybriden Verbundelementes existierten (Brettstapelaufbau und Massiv-Holz-Mauer-Elemente), mussten diese konstruktiv differierenden Möglichkeiten für die Recycling- und Aufbereitungsprozesse nicht unterschieden werden, da sie in diesem Falle nicht von Bedeutung sind. Die oben genannten positiven Materialeigenschaften der massiven Holzbauweisen lassen sich jedoch nicht auf die herkömmlichen des Holzrahmen- und Stahlbetonbauweisen übertragen. Der Aufwand für den Abbruch und die Aufbereitung dieser Elemente ist wesentlich höher als der des hybriden Verbundelementes. Eine anschließende Wiederverwendung oder -verwertung ist nur bedingt möglich.

3. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Arbeitspakete sehr erfolgreich bearbeitet wurden. Es sind hinreichende Untersuchungen und Überlegungen hinsichtlich eines vollkommen natürlichen und ökologischen, dabei gleichzeitig enorm energieeffizienten Aufbaus der Wandelemente vollzogen und getestet worden. Infolge der unerwartet komplexen sowie aufwendigen Herstellung, Erprobung und Anpassung von mineralischen Deckschichten sind verschiedene Auftragsvarianten erstellt werden, welche in Kombination mit einer strukturierten Holzoberfläche einen bestmöglichen direkten Verbund zum Holz ermöglichten. Das hierfür optimale Verhältnis des Anmachwassers, hinsichtlich des konträr verlaufenden Feuchte- sowie Abbindeverhaltens von Putz und Holz, stellte hierbei die größte Herausforderung dar. Durch verschiedene Modifizierungen der Putzschicht sowie durch den Einsatz eines geeigneten Sperrgrundes konnte diese Problematik erfolgreich eingegrenzt werden, so dass aus dem bautechnischen Herstellungsprozess des Putzes keine unzulässige Schädigung des Haftverbundes zwischen Holz und Putz infolge des unterschiedlichen Quell- und Schwindverhaltens entsteht. Damit ist es möglich, mittels praxisüblicher Putztechnik und -auftragungsvarianten eine mineralische Deckschicht mit ca. 40 mm Stärke direkt auf der Holzoberfläche dauerhaft zu applizieren. Der in dieser Weise erstellte hybride Wandaufbau besitzt hervorragende bauphysikalische Eigenschaften und bewirkt zusätzlich die bautechnisch nutzbare Versteifung der Wandelemente für Schubbeanspruchungen.
Mit den an Bauteilen realitätsnaher Abmessungen durchgeführten Schubversuchen konnten deutliche Steifigkeitserhöhungen gegenüber den Holz-Grundelementen dokumentiert werden. Zur Interpretation und Beurteilung des Schädigungsfortschrittes in der Verbundfuge unter zyklischer Belastung wurden ferner Versuche nach ISO 21581 erfolgreich realisiert. Als Resultat dieser Untersuchungen konnte ein in sich geschlossenes Konzept für die Ausbildung eines hybriden Wandverbundbauteils aus Holz und einer direkt darauf applizierten Deckschicht erarbeitet werden, welches sich durch einen zu vernachlässigenden regressiven Steifigkeitsabbau infolge wiederkehrender Belastung sowie ein ausgeprägtes duktiles Schubtragverhalten auszeichnet und vor allem auch für den Bereich des erdbebengerechten Bauens von besonderem Interesse ist, da ein sprödes Versagen ohne Vorankündigung weitestgehend ausgeschlossen werden kann.
Hinsichtlich der Recyclingfähigkeit war an Hand praktischer Versuche festzustellen, dass trotz des sehr guten Verbundes das Trennen der Materialen mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Mit dem Einsatz in der Bautechnik üblicher Werkzeuge und Geräte sind beim Rückbau dieser großformatigen Gebäudeelemente keinerlei Probleme zu erwarten. Eine Wiederverwendung der Bauelemente sowie eine bei Holz gegenüber der Wachstumsphase CO_2-neutrale thermische Verwertung ist ebenfalls möglich. Das untersuchte hybride Verbundbauteil kann als ganzheitlich nachhaltiges Bauelement angesehen werden, dessen Anwendung eine starke qualitative Aufwertung für den massiven Holzbau darstellt und durch die hohe Energieeffizienz sowohl bei der Herstellung, als auch beim Recycling oder der anschließenden Wiederverwendung ein deutliches Zukunftspotential besitzt.
Auf Basis dieser vielversprechenden und innovativen Forschungsergebnisse wäre daher zukünftig die in diesem Projektrahmen bisher nicht zu leistende Überführung respektive Erprobung in einem realen mehrgeschossigen Anwendungsobjekt hilfreich. Erste Kontakte zu Architekturbüros sowie potentiellen öffentlichen Auftraggebern sind bereits geknüpft worden. Als Ergebnis dieser auch unter Einbeziehung von Holzbauunternehmen im Rahmen der „Internationalen Thüringer Bauausstellung“ geführten Diskussionen konnte festgestellt werden, dass zu einigen speziellen Knotenpunkten bzw. Anschlussdetails noch weitere ergänzende Untersuchungen bzw. Bauteilversuche kurzfristig notwendig wären. Diese könnten im Rahmen eines hinsichtlich Laufzeit und Aufwand auf maximal 12 Monate begrenzten Anschlussförderprojektes mit einem als relativ gering anzusetzenden Förderumfanges in Zusammenarbeit sowie mit Unterstützung der bisher beteiligten „Industrie-Projektpartner“ realisiert werden und eine Markteinführung wirkungsvoll unterstützen.

4. Literaturverzeichnis

[Bay09] BAYER, W.: *Energie auf einen Blick. Statistisches Bundesamt.* Wiesbaden. November 2009.

[Bau07] *BGL Baugeräteliste 2007.* Hauptverband der deutschen Bauindustrie e.V. Bauverlag. 2007.

[BH95] BÖHRINGER, P.; HÖFFL, K.: *Baustoffe wiederaufbereiten und verwerten: mit 48 Tabellen*. AVS-Institut. Unterhaching. 1995.

[CC07] CLIMATE CHANGE: *Klimaschutz in Deutschland: 40 %-Senkung der CO_2-Emission bis 2020 gegenüber 1990.* Umweltbundesamt. Dessau. 05/ 2007.

[FS07] FRANZ, V.; SCHOPBACH, H.: *Tehnisch und wirtschaftlich optimierter Holzrahmenbau: Entwicklung von Konstruktionshilfen zur Realisierung von technisch und wirtschaftlich optimierten Gebäuden in Holzrahmenbauweise, unter besonderer Berücksichtigung der DIN 1052*. IRB Verlag. Stuttgart. 2007.

[Gew98] GEWIESE, A.: *Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. Ernst. Berlin. 1998.

[GH03] GRAUBNER, C.-A.; HÜSKE, K.: *Nachhaltigkeit im Bauwesen : Grundlagen - Instrumente - Beispiele*. Ernst&Sohn Verlag. Berlin. 2003.

[HK06] HOFFMANN, M.; KUHLMANN, W.: *Zahlentafeln für den Baubetrieb: mit 63 Beispielen*. Teubner-Verlag. Wiesbaden. 2006.

[Hol99] HOLZKAMP, J.: *Stoffstrommanagement ‚Bauen und Wohnen' dargestellt am Beispiel der Wiederverwendung von Bauteilen.* Technische Hochschule Aachen. Aachen. 1999.

[Jas97] JASPER, M.: *Altholzverwertung – die neuen Möglichkeiten: Markt- und Technologiestudie*. UZD-Verlag und Beratungs-GmbH. Dortmund. 1997.

[KGS02] KUHLMANN, U.; GEROLD, M.; SCHÄNZLIN, J.: *Trag- und Verformungsverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken.* In: Bauingenieur. 77(2002)01.

[Koc97] KOCH, E.: *Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau:ressourcenschonender Abbruch von Gebäuden und Industrieanlagen.* Springer. Berlin. 1997.

[Koh97] KOHLER, G.: *Recyclingpraxis Baustoffe.* Verlag TÜV Rheinland. Köln. 1997.

[KVWLM10] KLAUS, T.; VOLLMER, C.; WERNER, K.; LEHMANN, H.; MÜSCHEN, K.: *Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen.* Vorabdruck für die Bundespressekonferenz am 07. Juli 2010. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Juli 2010.

[Leh04] LEHMANN, S.: *Untersuchungen zur Bewertung von Verbundbauteilen aus Brettstapelelementen im Flächenverbund mit mineralischen Deckschichten.* Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar. 2004.

[LK04] LIPPOK, J.; KORTH, D.: *Abbrucharbeiten: Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung.* aus: Deutscher Abbruchverband e.V. [Hrsg.]. Rudolf Müller. Köln. 2004.

[Mar10] MARTENS, H.: *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis.* Spektrum Verlag. Heidelberg. 2010.

[Mic06] MICHELFELDER, B.: *Trag- und Verformungsverhalten von Kerven bei Brettstapel-Beton-Verbunddecken.* Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Konstruktion und Entwurf. 2006.

[Mül11] MÜLLER, A.: *Mechanische Verfahrenstechnik. aus*: Vorlesungsskript ABW. Bauhaus-Universität Weimar. Weimar. 2011.

[Mül22] MÜLLER, P.: *Patent Nr. 334431.* Kl. 371. Beton und Eisen. Heft XVII. 1922.

[Nic96] NICKEL, W.: *Recycling-Handbuch: Strategien, Technologien, Produkte.* VDI Verlag. Düsseldorf. 1996.

[RSSDJMS09] RAUTENSTRAUCH, K., SCHOBER, K.-U., SIMON, A., DORN, C., JAHREIS, M., MÜLLER, J., STIEF, A.: *Innovative nachhaltige Bauwerke durch effiziente Kombination von nachwachsenden Rohstoffen und einfach in Kreisläufe integrierbaren mineralischen Baustoffen in einer Hybrid-Bauweise.* Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 22024505 der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.. Bauhaus-Universität Weimar. Weimar. 2009.

[Schä03] SCHÄNZLIN, J.: *Zum Langzeitverhalten von Brettstapel-Beton-Verbunddecken.* Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Konstruktion und Entwurf. Stuttgart. 2003.

[Schm03] SCHMIDT, J.: *Holz/Calciumsulfatfließestrich-Verbunddecken.* Dissertation. Universität Leipzig. Shaker-Verlag. Leipzig. 2003.

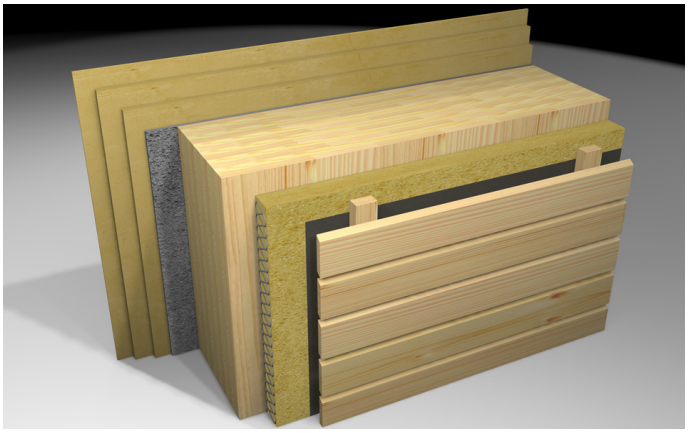
[Schr13] SCHROEDER, H.: *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. 2013

[Z-9.1-602] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: *MHM-Wandelemente (Massiv-Holz-Mauer-Wandelemente).* DIBt. Berlin. 04.04.2011.

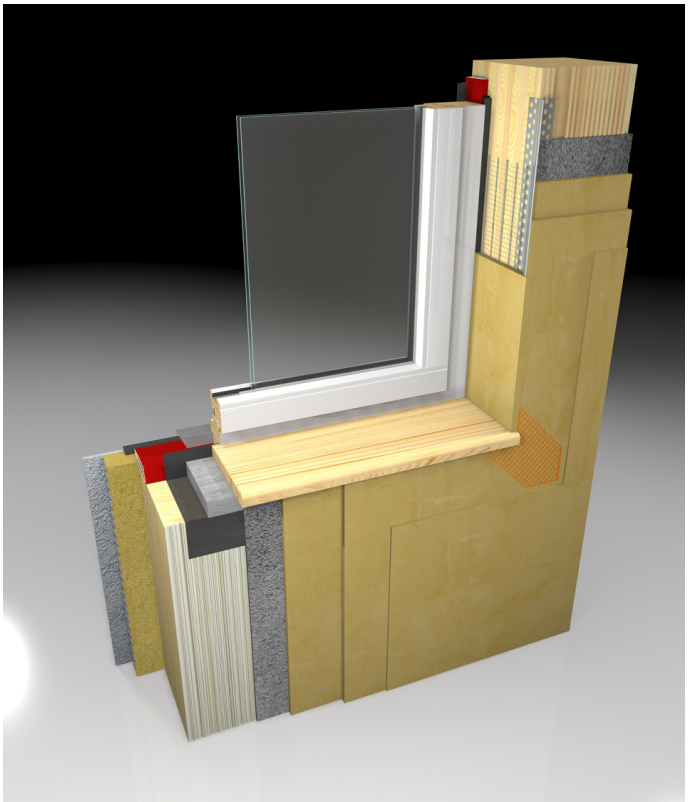
5. Anhang

Anhang 1: Prinzipieller Aufbau Außenwandbauteil mit horizontaler Holzschalung außen 43
Anhang 2: 3-D-Ansicht eines Fensterdetails mit Lehminnenputz 43
Anhang 3:Erste praktische Anwendung: Wohnhaus in Kulmbach/ Bayern 44
Anhang 4: MHM-Elemente nach Deckschichtauftrag in Wohnhaus Kulmbach/ Bayern..... 44
Anhang 5: Kellerdeckenanschluss mit gestufter Schwelle 45
Anhang 6: Kellerdeckenanschluss – gestufte Schwelle als visualisiertes 3-D-Modell..... 46
Anhang 7: Deckenanschluss Konsolenauflager mittels Stahlwinkeln..... 47
Anhang 8: Traufanschluss mit Pfette an der Wandinnenseite (in Anlehnung an MHM)..... 48
Anhang 9: Wand-Wand-Anschluss einer Außenecke..... 48
Anhang 10: Leistung und Kosten, Holzrahmenbau 49
Anhang 11: Leistung und Kosten, Stahlbetonbau 50
Anhang 12: Fließschema Bauteilwiederverwendung..... 51
Anhang 13: Leistung und Kosten bei der Bauteilwiederverwendung 51
Anhang 14: Fließschema Spanplattenherstellung 52
Anhang 15: Leistung und Kosten, Spanplattenherstellung..... 53
Anhang 16: Fließschema Einsatz in der Landwirtschaft..... 54
Anhang 17: Leistung und Kosten, Einsatz in der Landwirtschaft..... 55
Anhang 18: Fließschema Zementindustrie 56
Anhang 19: Leistung und Kosten, Einsatz in der Zementindustrie 56
Anhang 20: Fließschema Holzrahmenbau 57
Anhang 21: Fließschema Stahlbetonbau..... 57

Anhang 1: Prinzipieller Aufbau Außenwandbauteil mit horizontaler Holzschalung außen



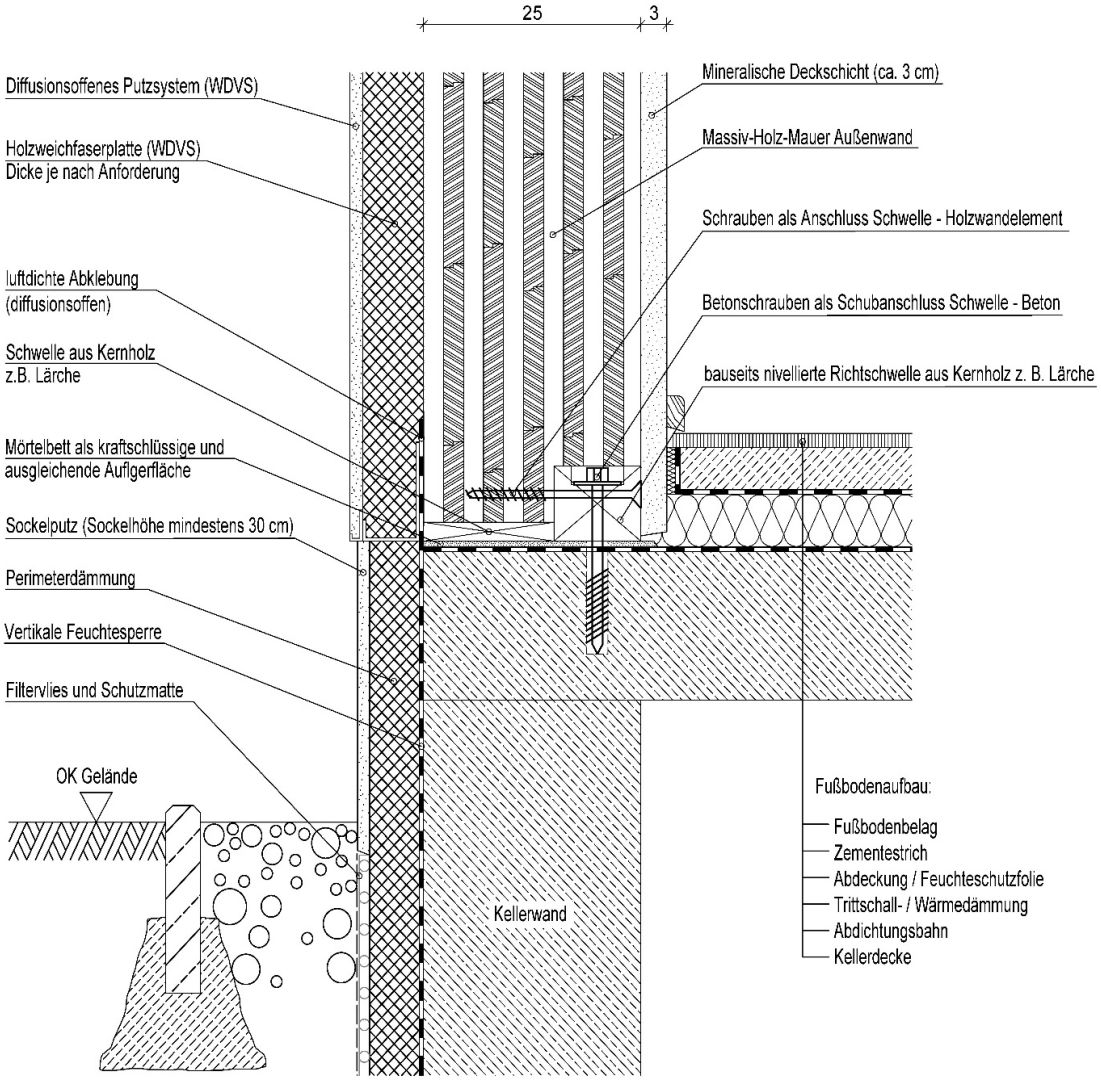
Anhang 2: 3-D-Ansicht eines Fensterdetails mit Lehminnenputz



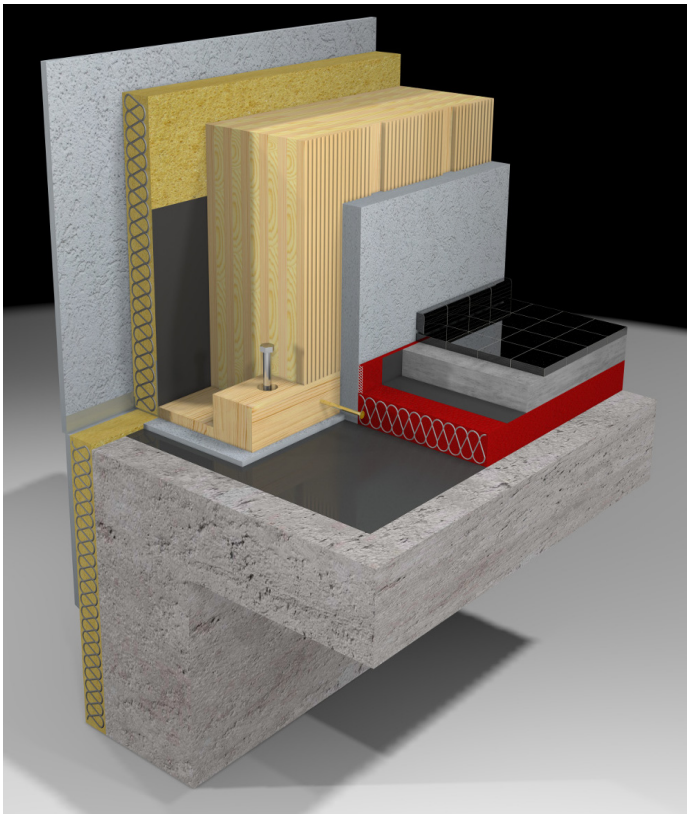
Anhang 3: Erste praktische Anwendung: Wohnhaus in Kulmbach/ Bayern

Anhang 4: MHM-Elemente nach Deckschichtauftrag in Wohnhaus Kulmbach/ Bayern

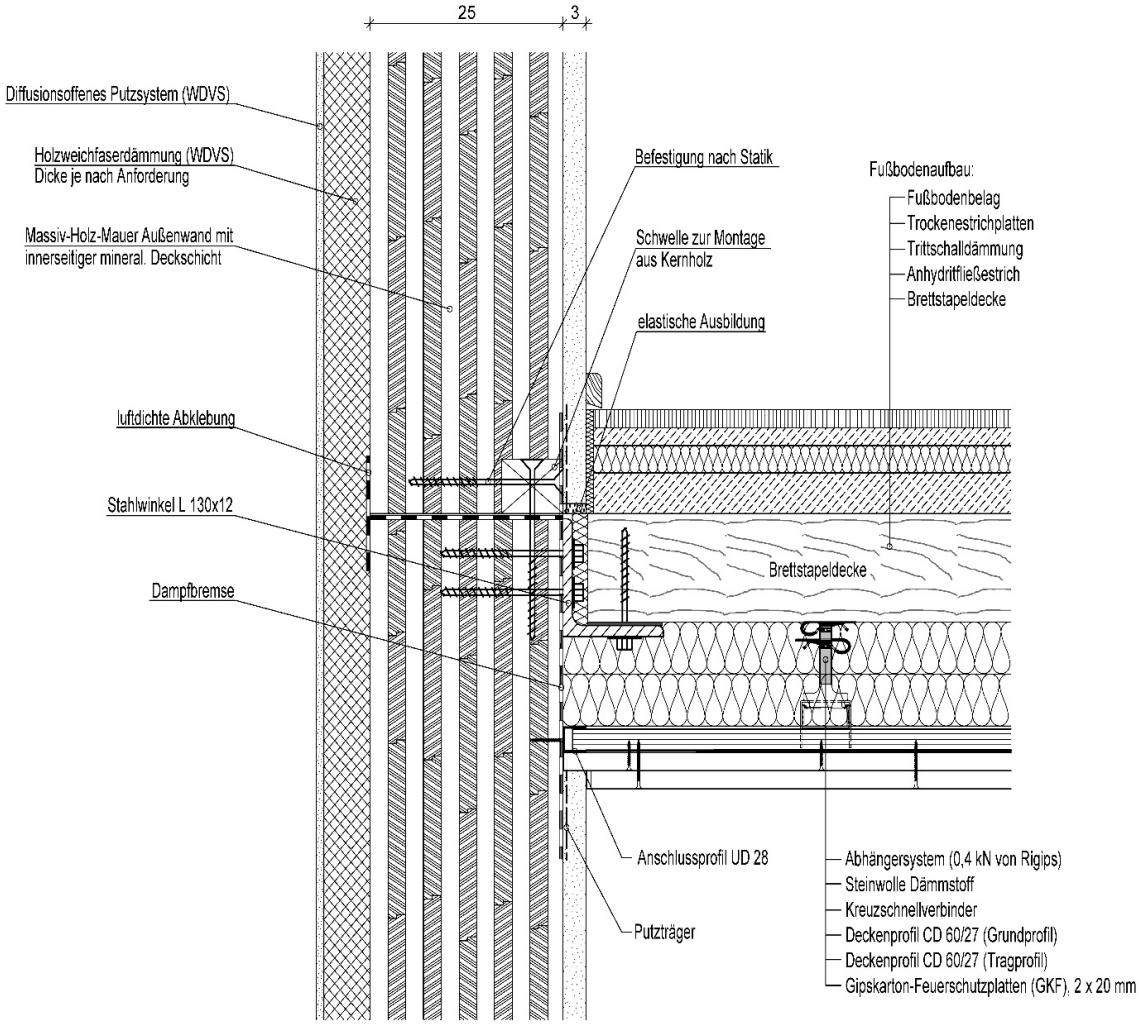
Anhang 5: Kellerdeckenanschluss mit gestufter Schwelle



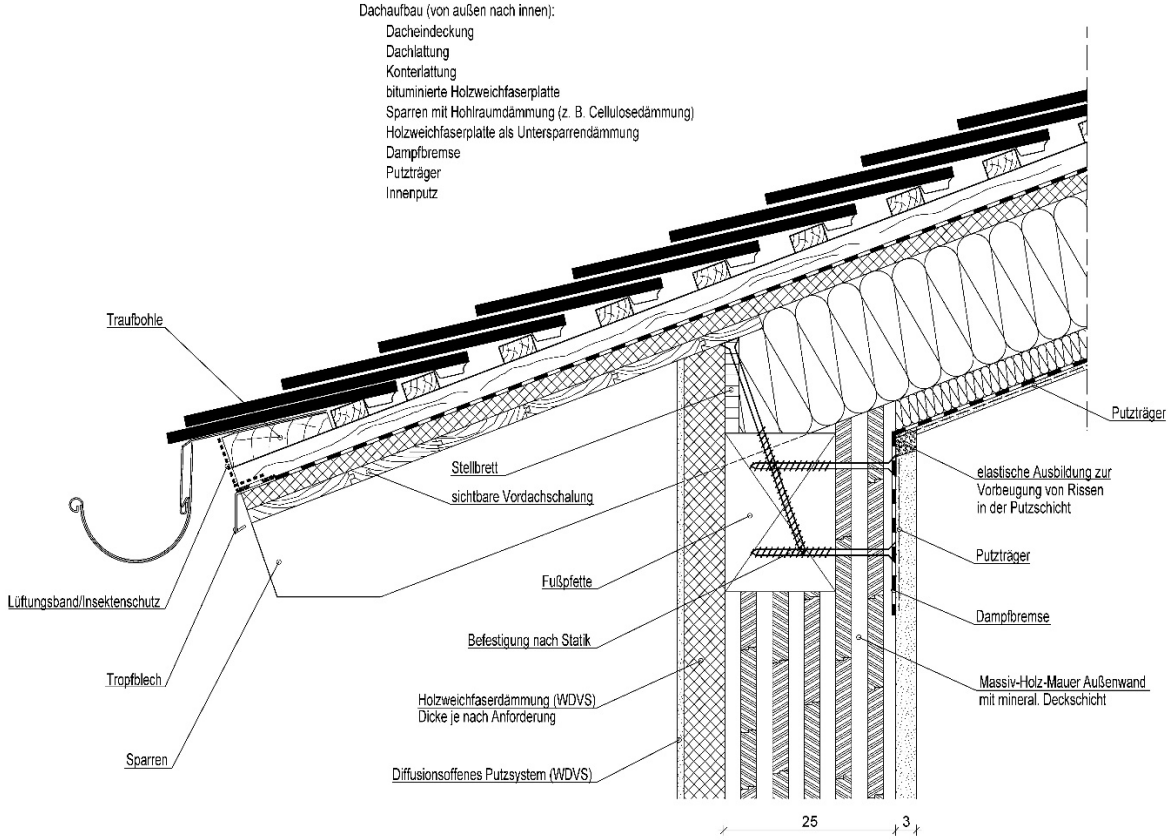
Anhang 6: Kellerdeckenanschluss – gestufte Schwelle als visualisiertes 3-D-Modell



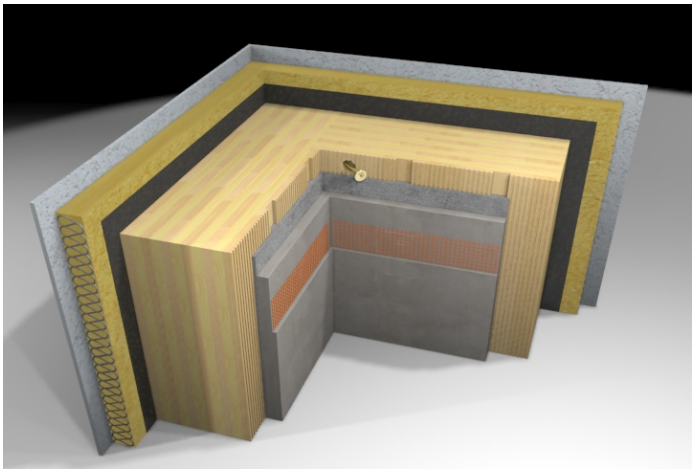
Anhang 7: Deckenanschluss Konsolenauflager mittels Stahlwinkeln



Anhang 8: Traufanschluss mit Pfette an der Wandinnenseite (in Anlehnung an MHM)



Anhang 9: Wand-Wand-Anschluss einer Außenecke

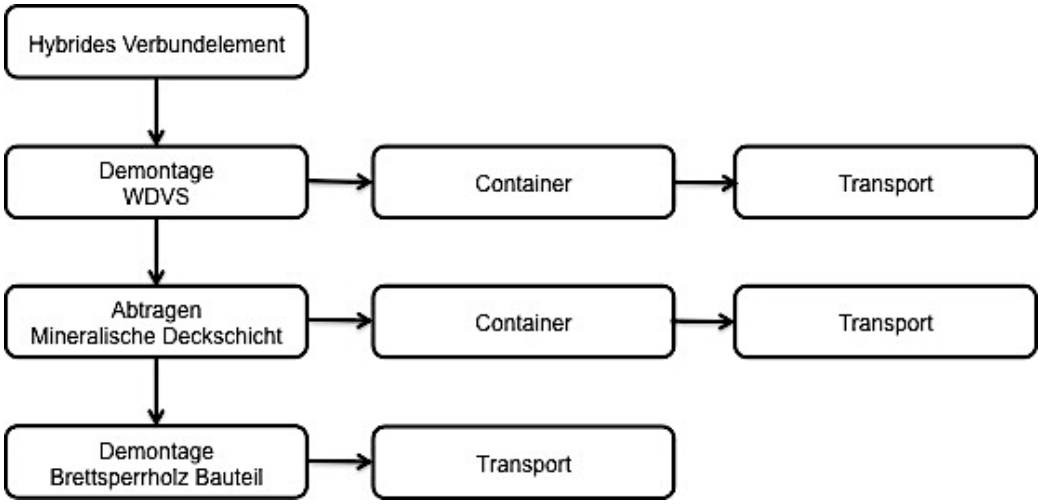


Anhang 10: Leistung und Kosten, Holzrahmenbau

Arbeitsschritt	Vorgehen	Gerätetyp	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Abbruch	Rückbau	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Teleskopausleger	170	85
	Aufgabe Kreis-schwingsieb	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Ladeschaufel	230	69
	Aufgabe Förderband inkl. Überbandmagnet-abscheider	Mini-Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk < 6t inkl. Ladeschaufel	35	14
Aufbereitung	Vorklassierung	Kreisschwingsieb	19	9
	Zerkleinerung	Prallbrecher	500	125
		Prallmühle	75	23
	Magnetabscheidung	Förderband inkl. Über-bandmagnet-abscheider	5	5
	Sortierung	Rollrostsieb	25	11
		Nassstromklassierung	30	22
		Querstromwindsichter	15	19
Metallische Fraktion	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Mineralische Fraktion	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Hölzerne Fraktion	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Leichtstoffe	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Personal (Baustelle)	5 Personen		0	190
Personal (Transport)	1 Personen		0	38
Summe			2384	1118

Anhang 11: Leistung und Kosten, Stahlbetonbau

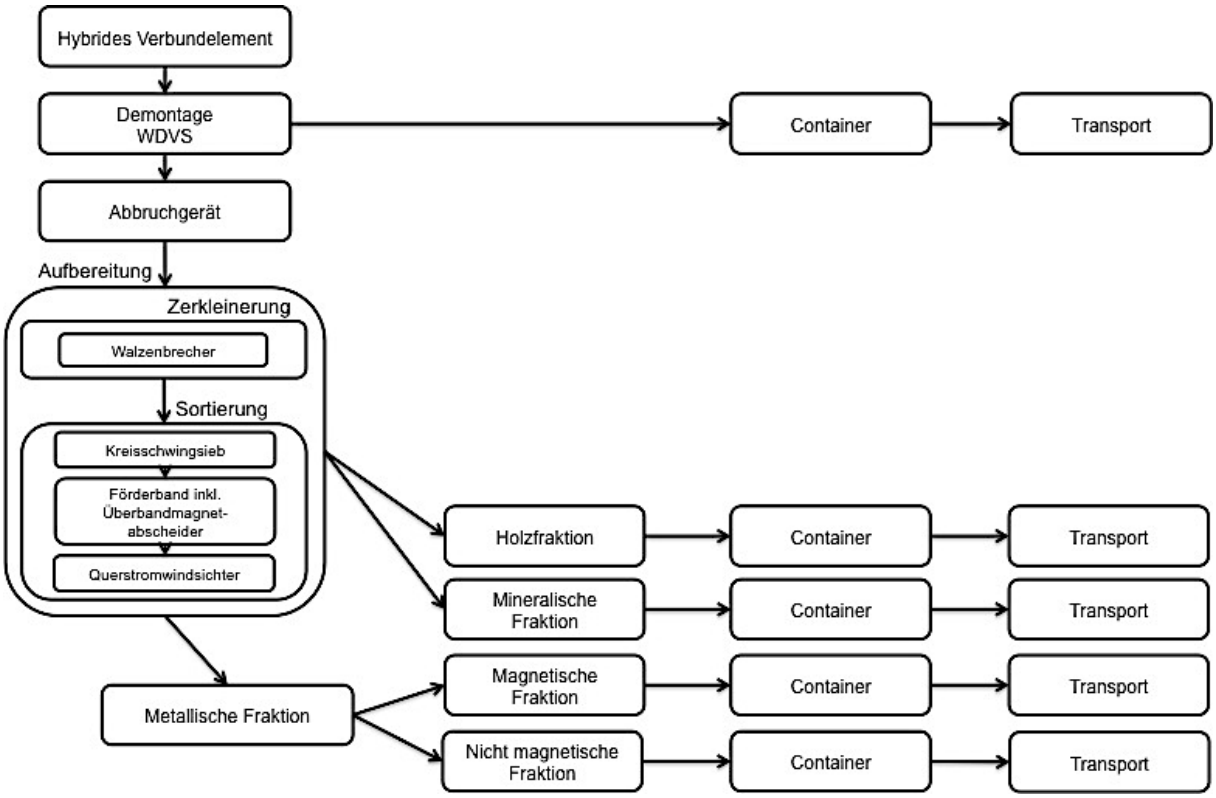
Arbeitsschritt	Vorgehen	Gerätetyp	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Abbruch	Rückbau mit Hydraulischer Beton-pulverisierer	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Teleskopausleger	170	85
		Pulverisierer	300	36
	Stahldurchtrennung	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Teleskopausleger	170	85
		Hydraulische Stahl-schere	230	25
	Stahlteilverladung	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Ladeschaufel	230	69
	Aufgabe	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Ladeschaufel	230	69
Aufbereitung	Vorklassierung	Kreisschwingsieb	19	9
	Zerkleinerung	Prallbrecher	500	125
	Magnetabscheidung	Förderband inkl. Über-bandmagnet-abscheider	5	5
	Sortierung	Rollrostsieb	25	11
	Rückführung der Korngrößen >100mm	Mini-Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk < 6 t inkl. Ladeschaufel	35	14
Metallische Fraktion	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Mineralische Frakti-on	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Personal (Baustelle)	5 Personen		0	190
Personal (Transport)			0	38
Summe			2554	1015



Anhang 12: Fließschema Bauteilwiederverwendung

Anhang 13: Leistung und Kosten bei der Bauteilwiederverwendung

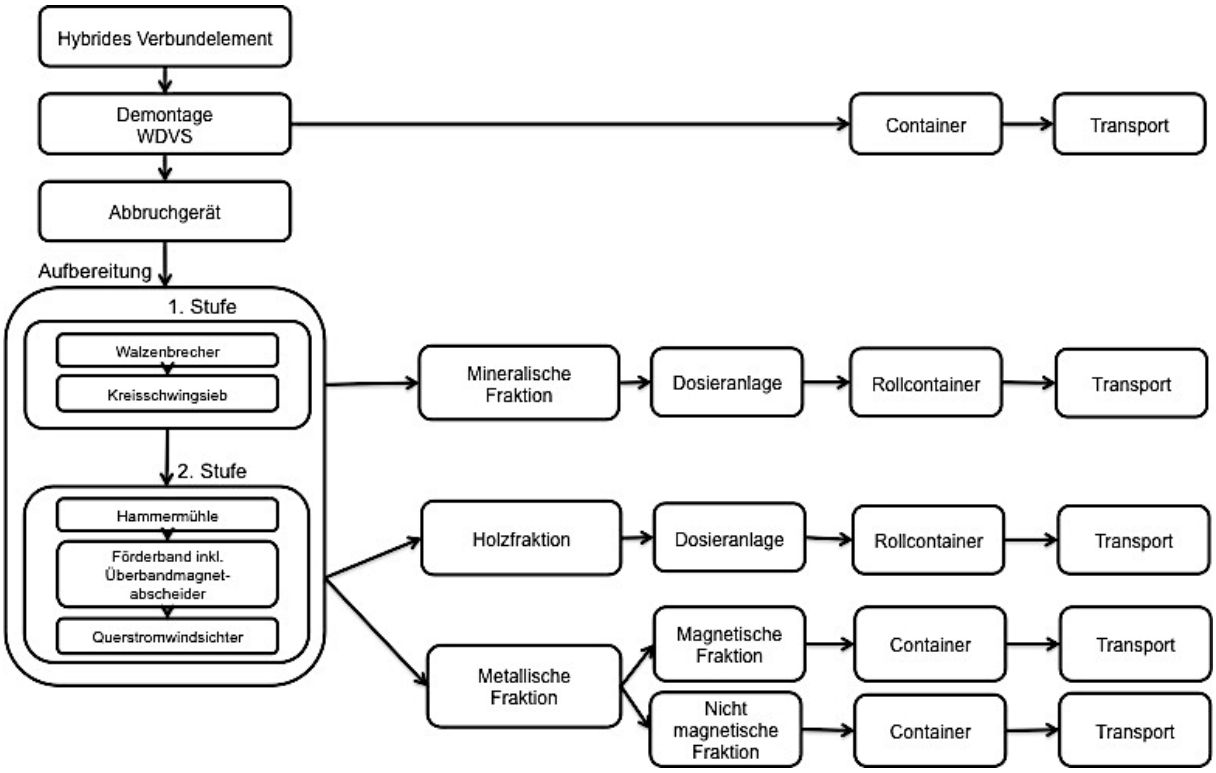
Arbeitsschritt	Vorgehen	Gerätetyp	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Demontage WDVS	Manuelles Lösen der Verbindungen	Schraubmaschine	1	2
	Kranarbeit	Autokran	70	23
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Abtragen minerali-sche Deckschicht	Hydraulisch, abrassiv	Hochdruckreiniger	13	2
	Schuttbeseitigung	Frontlader mit Reifen-fahrwerk	50	20
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Demontage Brett-sperrholzbauteil	Manuelles Lösen der Verbindungen	Schraubmaschine	1	2
	Kranarbeit	Autokran	70	23
	Transportfahrzeug	Sattelzugmaschine	340	95
	Abtransport	Sattelzugmaschine	340	97
Personal (Baustelle)	3 Personen		0	114
Personal (Transport)	1 Person		0	38
Summe			1525	670



Anhang 14: Fließschema Spanplattenherstellung

Anhang 15: Leistung und Kosten, Spanplattenherstellung

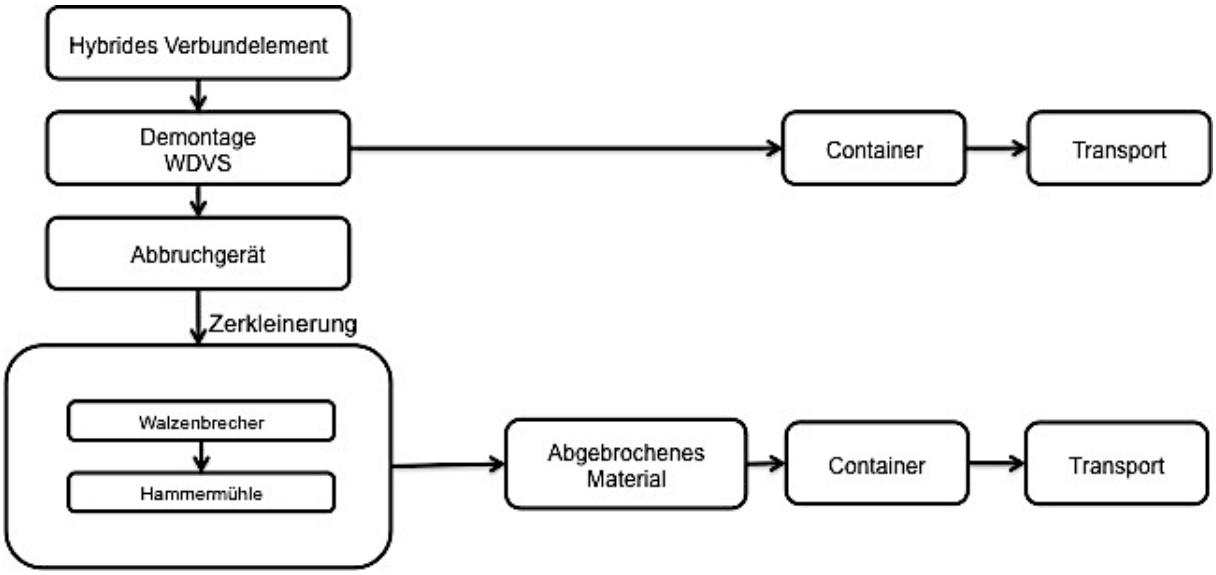
Arbeitsschritt	Vorgehen	Gerätetyp	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Demontage WDVS	Manuelles Lösen der Verbindungen	Schraubmaschine	1	2
	Kranarbeit	Autokran	70	23
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Abbruch	Rückbau	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t + hydraul. Holzspalter	230	72
	Aufgabe	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Ladeschaufel	230	69
Aufbereitung	Zerkleinerung	Walzenbrecher	60	35
	Sortierung	Kreisschwingsieb	19	9
	Magnetabscheidung	Förderband inkl. Über-bandmagnetabscheider	5	5
	Sortierung	Querstromwindsichter	15	19
Mineralische Fraktion	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Metallische Fraktion (magnetisch)	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Metallische Fraktion (nicht magnetisch)	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Hölzerne Fraktion	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Personal (Baustelle)	3 Personen		0	114
Personal (Transport)			0	38
Summe			2230	1021



Anhang 16: Fließschema Einsatz in der Landwirtschaft

Anhang 17: Leistung und Kosten, Einsatz in der Landwirtschaft

Arbeitsschritt	Vorgehen	Gerätetyp	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Demontage WDVS	Manuelles Lösen der Verbindungen	Schraubmaschine	1	2
	Kranarbeit	Autokran	70	23
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Abbruch	Rückbau	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t + Hydraul. Holzspalter	230	72
	Aufgabe	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Ladeschaufel	230	69
Aufbereitung	Zerkleinerung	Walzenbrecher	60	35
	Sortierung	Kreisschwingsieb	19	9
	Zerkleinerung	Hammermühle	75	23
	Magnetabscheidung	Förderband inkl. Über-bandmagnetabscheider	5	5
	Sortierung	Querstromwindsichter	15	19
Mineralische Fraktion	Dosieren	Dosierschieber	0,5	1
	Lagerung	Rollcontainer	0	1
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Metallische Fraktion (magnetisch)	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Metallische Fraktion (nicht magnetisch)	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Hölzerne Fraktion	Dosieren	Dosierschieber	0,5	1
	Lagerung	Rollcontainer	0	1
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Personal (Baustelle)	4 Personen		0	152
Personal (Transport)			0	38
Summe			2146	1056

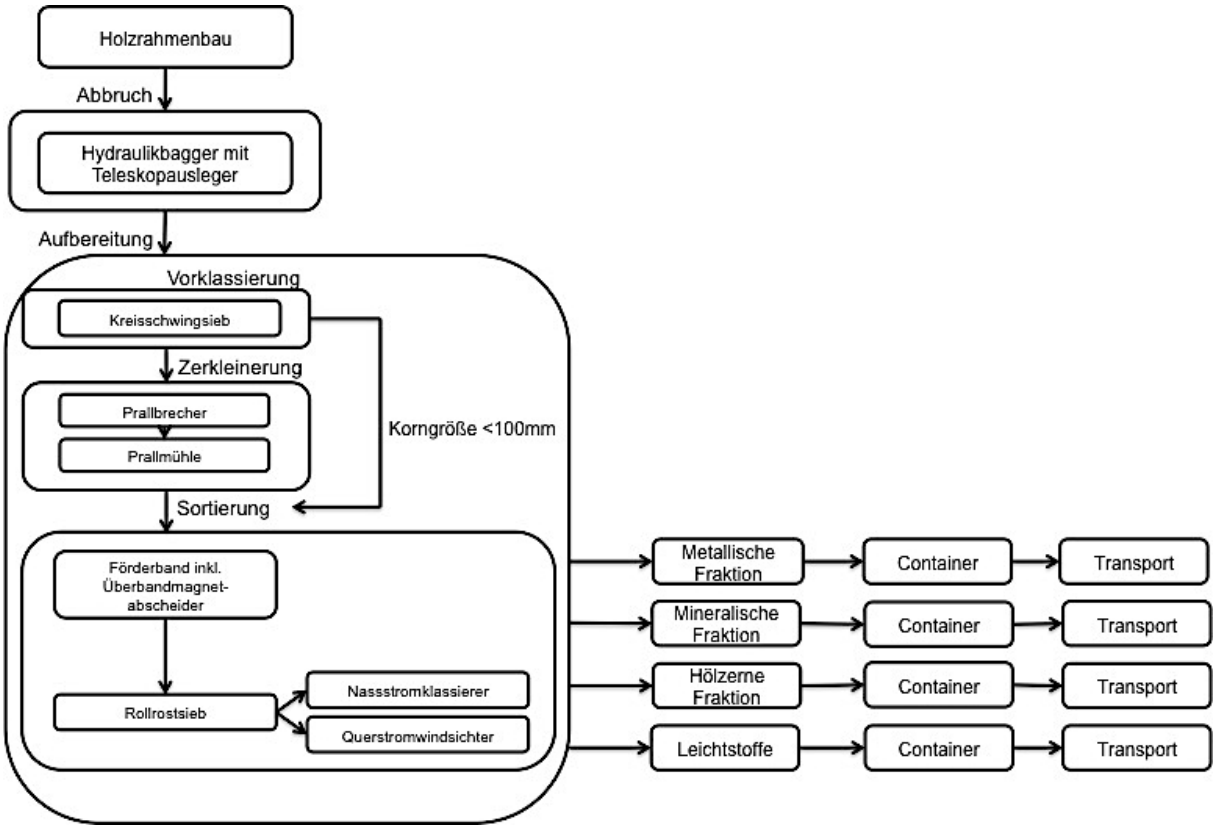
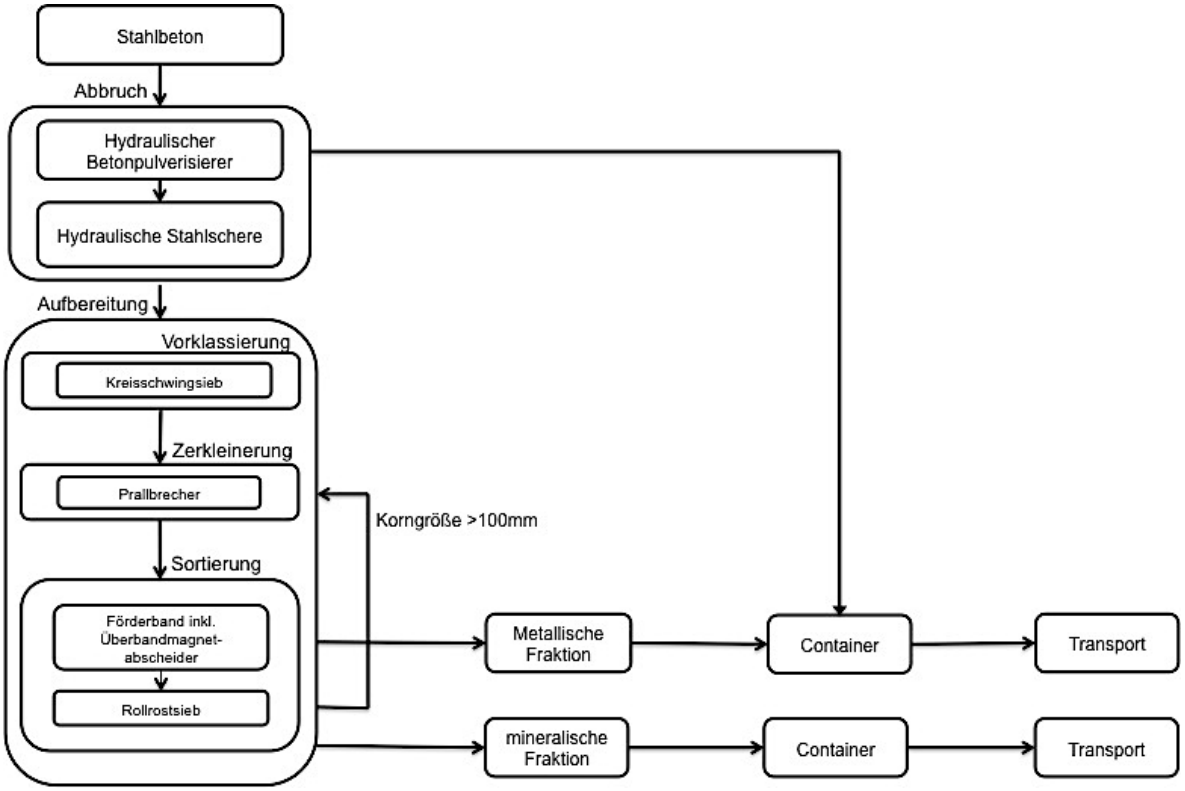


Anhang 18: Fließschema Zementindustrie

Anhang 19: Leistung und Kosten, Einsatz in der Zementindustrie

Arbeitsschritt	Vorgehen	Gerätetyp	Leistung [kW]	Kosten [€/h]
Demontage WDVS	Manuelles Lösen der Verbindungen	Schraubmaschine	1	2
	Kranarbeit	Autokran	70	23
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Abbruch	Rückbau	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t + Hydraul. Holzspalter	230	72
	Aufgabe	Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk > 6 t inkl. Ladeschaufel	230	69
Aufbereitung	Zerkleinerung	Walzenbrecher	60	35
	Zerkleinerung	Hammermühle	75	23
Abbruchmaterial	Lagerung	Container	0	2
	Containerdienst	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	30
	Abtransport	LKW (3-Achser) inkl. Containertransport-einrichtung	160	97
Personal (Baustelle)	3 Personen		0	114
Personal (Transport)	1 Person		0	38
Summe			1306	632

Anhang 20: Fließschema Holzrahmenbau



Anhang 21: Fließschema Stahlbetonbau