

Machbarkeitsstudie eines integralen Papier-Bau-Projektes mit dem Fokus auf konstruktiven, raumklimatischen und ökologischen Eigenschaften

Abschlussbericht über das Forschungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 37048/02-25 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Institut für Bauklimatik und Energie der Architektur (IBEA)

TU Braunschweig

Prof. Dipl.-Ing. Elisabeth Endres

Jan Mehnert, M.Sc.

Till Zihlmann, M.Sc.

Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen (RB)

RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Linda Hildebrand

Bozhidar Vladov, B.A.

Institut für Statik und Konstruktion (ISMD)

TU Darmstadt

Prof. Dr.-Ing Ulrich Knaack

Dr. Nadja Bishara

Alexander Wolf, M.A. Architekt

Februar 2023

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	37048/01-25	Referat	25	Fördersumme	124.248,-€
Antragstitel	Ein temporäres Papier-Haus <i>Machbarkeitsstudie eines integralen Papier-Bau-Projektes mit dem Fokus auf konstruktiven, raumklimatischen und ökologischen Eigenschaften</i>				
Stichworte	Bauen mit Papier, Recycling, Zirkularität, ökologisches Bauen				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
12 Monate	01.12.2021	30.11.2022	1/1		
Zwischenberichte	20.06.2022				
Bewilligungsempfänger	TU Darmstadt - Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D) <i>Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack (Sprecher)</i>			Tel	06151 1620313
	TU Braunschweig - Institut für Bauklimatik- und Energie der Architektur (IBEA) <i>Prof. Dipl.-Ing. Elisabeth Endres</i>			Fax	-/-
	RWTH Aachen - Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen (RB) <i>Prof. Dr. Linda Hildebrand</i>			Projektleitung	
				TU Darmstadt	
				Bearbeiter	Jan Mehnert, M.Sc.
					Till Zihlmann, M.Sc.
					Bozhidar Vladov, B.A.
					Alexander Wolf, M.A.
Kooperationspartner	studio5a, Papier- u. Kartonfabrik Varel GmbH, Thüringer Fiber-Trommel GmbH Wellpappe Alzenau GmbH & Co. KG				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Aufgrund der weltweiten Ressourcenverknappung besteht im Bauwesen erheblicher Bedarf nach einer verstärkten Kreislaufplanung und einem erhöhten Einsatz nachwachsender Ressourcen. Um den CO₂-Ausstoß des Gebäudesektors zu senken, ist es wichtig sowohl die Emissionen während der Nutzungsphase durch robuste Energieeffizienz-Maßnahmen als auch die Emissionen in der Herstellungsphase durch den Einsatz CO₂-bindender Ressourcen, wie beispielsweise Holz, zu reduzieren. Primär muss bei allen Planungsschritten die Rückbaubarkeit und deren Zirkularität mitgedacht werden, denn nur dann kann der Beitrag zum Klima- und Umweltschutz gelingen. Papierwerkstoffe bestehen zu einem Großteil aus dem Rohstoff Holz und gehören somit in die Gruppe der erneuerbaren und CO₂-bindenden Ressourcen. Zudem existieren weit entwickelte Rezyklierverfahren und hohe Altpapiereinsatzquoten für Papierwerkstoffe, womit sie grundlegend als kreislaufgerechter Werkstoff einzustufen sind.

Im Anschluss an die bereits erfolgten Grundlagenarbeiten zum Thema „Bauen mit Papier“ erfolgte im Rahmen dieses Projekts die Konzeptionierung eines bewohnbaren temporären Gebäudes aus Papier unter Berücksichtigung der Aspekte Zirkularität, Papier-spezifische Konstruktionsweisen und Raumklima.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurden diverse Lösungsansätze zum Bau eines temporären Papier-Hauses untersucht. Hierbei wurden durch das Forschungskonsortium gemeinsam und interdisziplinär ein Entwurfskonzept für ein Wohnhaus erarbeitet. Zunächst wurden unterschiedliche Gebäudekubaturen, sowie Konstruktionsweisen skizziert, welche aussichtsreich für eine Ausführung erschienen. Nachdem sich früh auf eine architektonische Formgebung geeinigt werden konnte, wurden die Konstruktionsweisen eingehend auf ihre Eigenschaften und die damit verbundene Eignung zur Ausführung untersucht. Der finale Planungsstand sieht ein Haus in Nur-Dach-Typologie vor, welches in einer an den Holzrahmenbau angelehnten Konstruktionsweise errichtet werden soll.

Bei der Untersuchung der Konstruktionsweisen haben die beteiligten Institute die zuvor skizzierten Bauweisen jeweils anhand ihrer eigenen Expertise weiterentwickelt und bewertet. Während durch die TU Darmstadt vor allem statisch-konstruktive Belange betrachtet wurden, widmete sich die TU Braunschweig bauklimatischen Fragestellungen und die RWTH Aachen den ökologischen Aspekten des Vorhabens. Die vertiefte Betrachtung der aus unterschiedlichen Blickrichtungen entwickelten Wandaufbauten hatte zum Ziel, eine allgemeine Einordnung betreffend Konstruktion und Tragwerk, der bauklimatische Performance, sowie ökologischer Aspekte vorzunehmen. Die Evaluierung der betrachteten Konstruktionsweisen erfolgte durch den Bau von Mock-Ups und Prototypen, Simulationen, sowie experimentell an klein- bis mittelformatigen Probekörpern. Aus diesem Vorgehen konnten Handlungsempfehlungen für die Weiterführung des Vorhabens abgeleitet werden, welche in einem Folgeprojekt auch in die Errichtung eines Wohngebäudes aus Papier münden soll.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Im Projektverlauf wurde eine Adaption der aus dem Holzbau bekannten Ständerbauweise als geeignete Konstruktion für das projektierte Papiergebäude ermittelt. Die Fertigung könnte gleichermaßen in einer Fertigteilmontagebauweise als auch in Situ auf der Baustelle stattfinden. Für alle wesentliche Bestandteile der Ständerkonstruktion wurde ein geeignetes Pendant aus Papier, bzw. Karton gefunden, wodurch eine gute Rezyklierbarkeit der Gesamtkonstruktion erreicht werden könnte. Zur Validierung einiger der zunächst eher abschätzend durchgeführten Experimente wird eine Vertiefende Untersuchung der Bauteile in einem Folgeprojekt empfohlen.

Die Projektergebnisse sollen im Herbst 2023 im Rahmen der alle zwei Jahre stattfindenden BAMP!-Konferenz einem Fachpublikum präsentiert werden. Ferner ist es vorgesehen, dass die drei beteiligten Institute jeweils eigene Publikationen zu den von ihnen bearbeiteten Teilbereichen in Fachzeitschriften veröffentlichen.

Fazit

Die Errichtung und anschließende Nutzung eines Gebäudes, welches im Wesentlichen aus Papierwerkstoffen besteht, erscheinen dem Grunde nach möglich. Die durchgeführten Experimente und Simulationen kamen zu vielversprechenden Ergebnissen, welche jedoch im Nachgang noch tiefergehend untersucht werden müssten. Dies steht insbesondere im Kontext der rechtlichen Anforderungen, die der Gesetzgeber an Gebäude stellt. Papier als bisher noch nicht regulierter Baustoff wird sich bei einem Baukonstruktiven Einsatz denselben Kriterien hinsichtlich Tragfähigkeit, Brandschutz und Bauphysik stellen müssen, welche auch für konventionelle Baustoffe und Konstruktionen Gültigkeit haben. Der Einsatz von Papier als Baumaterial bietet aufgrund seiner Zirkularität eine gute Chance das Bauen nachhaltiger zu gestalten. Die Überführung der im Projektverlauf erarbeiteten Planungen in ein Folgeprojekt, welches die Errichtung eines bewohnbaren Gebäudes zum Inhalt hat wird dringend empfohlen um der Einführung von Papier als Baumaterial weiteren Vorschub zu leisten.

Projektkennblatt	2
1 Zusammenfassung.....	12
2 Ausgangslage.....	14
2.1 Konzeption eines temporären Hauses aus Papier.....	16
3 Fragestellung und Anforderungen	20
3.1 Gestaltung, Konstruktion, Statik, Fassade (ISMD)	20
3.2 Bauklimatik (IBEA)	24
3.2.1 Papier als Baustoff.....	24
3.2.2 Fragestellung und Methodik	25
3.2.3 Randbedingungen für die Simulation	26
3.3 Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Papierkonstruktionen (RB).....	40
3.3.1 Ökologischer Eigenschaften von Papierprodukten im Gebäude.....	40
3.3.2 Fragestellung und Methodik	40
4 Vorkonzeption Wandaufbau.....	43
4.1 Gestaltung, Konstruktion, Statik, Fassade (ISMD)	43
4.1.1 Maße und Dimensionen	43
4.1.2 Mock-Ups der Konstruktionstypen.....	43
4.2 Bauphysik und Bauklimatik (IBEA).....	46
4.2.1 Betrachtung 1 – Konstruktionsvarianten.....	47
4.2.2 Betrachtung 2 – Vergleichsreferenzen	48
4.2.3 Betrachtung 3 – Wandaufbau	51
4.3 Kreislaufkonzept (RB)	56
4.3.1 Papierwerkstoffe	56
4.3.2 Bindemittel	60
4.3.3 Mock-Ups.....	62
5 Experimentelle Evaluation	69
5.1 Statik und Brandschutz (ISMD).....	69
5.1.1 Brandschutz.....	69
5.1.2 Statik	72
5.2 Bauklimatische Prüfung (IBEA).....	81
5.2.1 Physikalischer Werte von Papier	81
5.2.2 Sommerlicher Wärmeschutz	86
5.2.3 Experimentelle raumklimatische Untersuchung	100
5.3 Kreislaufeignung (RB)	103
5.3.1 Karton Verbundplatte:	103
5.3.2 Klebetests	104
5.3.3 Dekonstruktion	107
5.3.4 Zwischenfazit	113
6 Fazit und Handlungsempfehlung	115

6.1	Konstruktion	115
6.2	Bauklimatik	117
6.3	Kreislaufkonzept.....	118
6.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse.....	120
6.5	Ausblick	121
7	Literaturverzeichnis	122
Anhänge	123

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildungsverzeichnis IBEA

ABB. A 1: STANDORT FRANKFURT AM MAIN	27
ABB. A 2: GEOMETRIE STANDARTRAUM.....	28
ABB. A 3: DECKENAUFBAU STANDARTRAUM	28
ABB. A 4: WANDAUFBAU UND FASSADENAUFBAU STANDARTRAUM	29
ABB. A 5: SIMULATION DER AUSGANGSPARAMETER	30
ABB. A 6: SENSITIVITÄTSANALYSE A01, LÜFTUNG	32
ABB. A 7: SENSITIVITÄTSANALYSE A02A, FENSTERABMESSUNG	33
ABB. A 8: SENSITIVITÄTSANALYSE A02B, VERSCHATTUNG	34
ABB. A 9: SENSITIVITÄTSANALYSE, LÜFTUNG UND VERSCHATTUNG ANGEPASST	35
ABB. A 10: PROFIL INTERNE LASTEN, WOHNZIMMER, WERKTAG	36
ABB. A 11: PROFIL INTERNE LASTEN, SCHLAFZIMMER, WERKTAG	36
ABB. A 12: SENSITIVITÄTSANALYSE A03, INTERNE LASTEN.....	37
ABB. A 13: A03, INTERNE LASTEN, ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN.....	38
ABB. A 14: BASISPARAMETER FENSTER	39
ABB. A 15: WANDAUFBAU KONVENTIONELLE HOLZSTÄNDERWAND (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE)	49
ABB. A 16: WANDAUFBAU KONVENTIONELLER MASSIVBAU (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE)	49
ABB. A 17: KONZEPT LEICHTBAUWEISE	52
ABB. A 18: SCHICHTEN KONZEPT PAPIERWANDAUFBAU	52
ABB. A 19: KARTON VERBUNDPLATTE INNEN (KVP_I01)	53
ABB. A 20: KARTON VERBUNDPLATTE AUßEN (KVP_A01)	54
ABB. A 21: WANDAUFBAU PAPIERBAUSTOFFE (P00_00_00_00) (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE).....	54
ABB. A 22: KARTON VERBUNDPLATTE (KVP_00).....	83
ABB. A 23: STUNDEN >26 °C, PAPIER_MAX, PAPIER_MIN, PAPIER_GEMITTELT.....	86
ABB. A 24: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN, PAPIER_MAX, PAPIER_MIN, PAPIER_GEMITTELT	86
ABB. A 25: SCHICHTEN KONZEPT PAPIERWANDAUFBAU	87
ABB. A 26: VERSUCHSREIHE 01, VERTEILUNG DER STÜNDLICHEN OP. RAUMTEMP. GEGENÜBER DER AUßENLUFTEMP.	89
ABB. A 27: VERSUCHSREIHE 01: ANZAHL STUNDEN >26°C.....	89
ABB. A 28: VERSUCHSREIHE 01: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	89
ABB. A 29: VERSUCHSREIHE 02: ANZAHL STUNDEN >26°C.....	91
ABB. A 30: VERSUCHSREIHE 02: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	91
ABB. A 31: VERSUCHSREIHE 03: ANZAHL STUNDEN >26°C.....	92
ABB. A 32: VERSUCHSREIHE 03: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	92
ABB. A 33: VERSUCHSREIHE 04: ANZAHL STUNDEN >26 °C	93
ABB. A 34: VERSUCHSREIHE 04: ÜBERTEMPERATUR-GRADSTUNDEN	93
ABB. A 35: VERSUCHSREIHE 05: ANZAHL STUNDEN >26°C.....	94
ABB. A 36: VERSUCHSREIHE 05: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	94

ABB. A 37: P13_00_01_00, WANDAUFBAU PAPIER OPTIMIERT (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE)	95
ABB. A 38: VERSUCHSREIHE 06A: ANZAHL STUNDEN >26°C	96
ABB. A 39: VERSUCHSREIHE 06A: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	96
ABB. A 40: VERSUCHSREIHE 06B: ANZAHL STUNDEN >26°C	98
ABB. A 41: VERSUCHSREIHE 06B: ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN.....	98
ABB. A 42: VERSUCHSREIHE 07, ANZAHL STUNDEN >26°C	99
ABB. A 43: VERSUCHSREIHE 07, ÜBERTEMPERATURGRADSTUNDEN	99
ABB. A 44: SCHEMATISCHE SPRUNGANTWORTEN VON DREI KONSTRUKTIONS VARIANTEN	100
ABB. A 45: AUFBAU DER TESTBOX INNERHALB DER KLIMAKAMMER (FOTOS: LILLI BÖHM)	102

Tabellenverzeichnis IBEA

TAB. A 1: RANDBEDIENUNGEN, PARAMETER BEIM START DER SIMULATION (AUSGANGSVARIANTE)	27
TAB. A 2: RANDBEDIENUNGEN, RAUMDIMENSIONEN STANDARTRAUM	27
TAB. A 3: AUSGANGSPARAMETER FENSTER STANDARTRAUM	29
TAB. A 4: INTERNE LASTEN STANDARTRAUM.....	29
TAB. A 5: SENSITIVITÄTSANALYSE A01, IDEALES NUTZERVERHALTEN NACHTLUFTSPÜLUNG	31
TAB. A 6: SENSITIVITÄTSANALYSE A01, IDEALES NUTZERVERHALTEN TAG- UND NACHTLUFTSPÜLUNG.....	31
TAB. A 7: BASISPARAMETER LÜFTUNG	38
TAB. A 8: BASISPARAMETER INTERNE LASTEN.....	39
TAB. A 9: ÜBERSICHT WANDAUFBAUTYPEN, TYP 2A, TYP 2B, TYP 4A, TYP 4B (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE)	47
TAB. A 10: OPTIMIERUNG VON TYP 2A UND TYP 4B (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE)	48
TAB. A 11: ÜBERSICHT DER VIER WANDKONSTRUKTIONEN UND DEN ZWEI REFERENZWANDAUFBAUTEN (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE).....	50
TAB. A 12: ANFORDERUNG AN DIE UNTERSCHIEDLICHEN SCHICHTEN DES PAPIERWANDAUFBAUS	53
TAB. A 13: VERGLEICH – PAPIERWANDAUFBAU (P00_00_00_00), LEICHTBAU, MASSIVBAU (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE) ...	55
TAB. A 14: BAUPHYSIKALISCHE WERTE PAPIERWERKSTOFFE [BKH20] [UBA23] [VKJ12]	82
TAB. A 15: ABSTRAKTION EINS, PHYSIKALISCHE WERTE (WELLPAPPE, VOLLPAPPE, KVP).....	83
TAB. A 16: PHYSIKALISCHE WERTE, ABSTRAKTE BAUSTOFFE VOLLPAPPE UND WELLPAPPE	84
TAB. A 17: PHYSIKALISCHE WERTE, ABSTRAKTE BAUSTOFFE KVP_I01 UND KVP_A01.....	84
TAB. A 18: MAXIMAL, DURCHSCHNITTS UND MINIMAL WERTE, WELLPAPPE, VOLLPAPPE, KVP	85
TAB. A 19: KVP_I01 UND KVP_A01	87
TAB. A 20: VERSUCHSREIHE 01: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN	88
TAB. A 21: VERSUCHSREIHE 02: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN	90
TAB. A 22: VERSUCHSREIHE 03: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN	91
TAB. A 23: ROHDICHTE UND SPEZ. WÄRMEKAPAZITÄT, LEHMPLATTE, OSB PLATTE, KVP_I01.....	92
TAB. A 24: VERSUCHSREIHE 04: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN	93
TAB. A 25: VERSUCHSREIHE 05: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN	94
TAB. A 26: VERSUCHSREIHE 6A: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN (ZEICHNUNG: WWW.UBAKUS.DE)	96
TAB. A 27: VERSUCHSREIHE 06B: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN	97

TAB. A 28: VERSUCHSREIHE 7: ÜBERSICHT WANDAUFBAUVARIANTEN.....	99
TAB. A 29: WELLPAPPE ALS DÄMMSTOFF.....	117
TAB. A 30: KVP_I01 ALS INNERE BEPLANKUNG	118
TAB. A 31: KVP_A01 ALS ÄUßERE BEPLANKUNG	118

Abbildungsverzeichnis ISMD

ABB. B 1: AXONOMETRIE UND PLÄNE VARIANTE 1	16
ABB. B 2: AXONOMETRIE UND PLÄNE VARIANTE 2	16
ABB. B 3: AXONOMETRIE UND PLÄNE VARIANTE 3	17
ABB. B 4: AXONOMETRIE UND PLÄNE VARIANTE 4	17
ABB. B 2: MÖGLICHE BAUTEILAUFBAUTEN TYP 1 (LINKS) UND 2 (RECHTS) IN AP1	18
ABB. B 3: MÖGLICHE BAUTEILAUFBAUTEN TYP 3 (LINKS) UND 4 (RECHTS) IN AP1.....	19
ABB. B 4: KARTON-VERBUNDPLATTE	20
ABB. B 5: TYPENÜBERSICHT DIMENSIONIERUNG	21
ABB. B 6: DIMENSIONIERUNG TYP 2A + B	22
ABB. B 7: DIMENSIONIERUNG TYP 3 A + B	22
ABB. B 8: DIMENSIONIERUNG TYP 4 A + B	23
ABB. B 92: MAßE DER PROTOTYPEN	43
ABB. B 103: KONSTRUKTIONSTYPEN 2A (LINKS) UND 2B(RECHTS).....	44
ABB. B 114: KONSTRUKTIONSTYPEN 4A (LINKS) UND 4B(RECHTS).....	45
ABB. B 125: ÜBERSICHT ALLER GEBAUTEN PROTOTYPEN (ISMD NR. 1-4 VON LINKS).....	46
ABB. B 146: AUFBAU BRANDVERSUCHE.....	70
ABB. B 157: BRANDVERSUCH ESB: 0:30MIN VERKOHLUNG / 1:10MIN ASCHEN / 6:10MIN GLUT IM ZENTRUM / 11:10 DURCHBRUCH	71
ABB. B 168: BRANDVERSUCH KARTON: 0:10MIN VERKOHLUNG / 0:40MIN FLAMMEN / 3:10MIN AUSBREITUNG BIS ZUM OBEREN RAND / 10:20 DURCHBRUCH.....	72
ABB. B 179: PROBEKÖRPER BAUTEILVERSUCH, AUFBAU UND MAßE.....	74
ABB. B 20: LAST-VERFORMUNGSKURVE BAUTEILVERSUCH.....	75
ABB. B 21: VERSUCHSAUFBAU BAUTEILVERSUCH (LINKS) VERSAGEN DER BEPLANKUNGS-BEFESTIGUNG(RECHTS).....	75
ABB. B 22: RAHMENVERSAGEN BEI ESB-BEPLANKUNG (LINKS) UND KARTON-BEPLANKUNG(RECHTS)	76
ABB. B 23: SCHUBVERSUCH, AUFBAU (LINKS) UND PROBEKÖRPER NACH DEM VERSUCH (RECHTS).....	76
ABB. B 24: LAST-VERFORMUNGSKURVE SCHUBVERSUCH.....	77
ABB. B 25: SCHADENSBIELD AN KARTON (LINKS) UND ESB (RECHTS).....	78
ABB. B 26: VERSUCHSAUFBAU DRUCKVERSUCH.....	79
ABB. B 27: LAST-VERFORMUNGSKURVE DRUCKVERSUCH	79
ABB. B 28: SCHADENSBIELD LIEGENDE WELLE (LINKS) UND STEHENDE WELLE (RECHTS).....	80
ABB. B 29: VORGESCHLAGENE KUBATUR UND BAUWEISE	115

Abbildungsverzeichnis RB

ABB. C: 1 NABU.....	56
ABB. C 2 DARSTELLUNG VERSCHIEDENER PAPIERPRODUKTE MIT IHREM ANSATZ VON SEKUNDÄRMATERIAL	57
ABB. C 3: PRIMÄRENERGIEBEDARF UND WASSERBEDARF VOM PAPIER UND ALTPAPIER [UMB22]	58
ABB. C 4: GEGENÜBERSTELLUNG DÄMMSTOFFE	59
ABB. C 5: LINKS SCHEMA MOLEKÜLE MECHANISCHE BINDUNG, RECHTS SCHEMA PHYSIKALISCHER/CHEMISCHER BINDUNG [EID06] .	61
ABB. C 6: WANDAUFBAU PROTOTYP 1	62
ABB. C 7: WELLPAPPEAUFSCHICHTUNG.....	62
ABB. C 8: VOLLHOLZKNOTENPUNKT.....	63
ABB. C 9: WANDAUFBAU PROTOTYP 2	63
ABB. C 10: EXPLOSIONSZEICHNUNG	64
ABB. C 11: WANDAUFBAU PROTOTYP 3	65
ABB. C 12: WELLPAPPEDÄMMUNG.....	65
ABB. C 13: HOLZVERBINDUNGSPLATTE	65
ABB. C 14: WANDAUFBAU PROTOTYP 4	66
ABB. C 15: WANDAUFBAUFOTO.....	66
ABB. C 16: WANDAUFBAU PROTOTYP 5	67
ABB. C 17: WANDAUFBAUFOTO.....	67
ABB. C 18: WANDAUFBAU PROTOTYP 6	67
ABB. C 19: WANDAUFBAUFOTO.....	68
ABB. C 20: KARTON VERBUNDPLATTE 1 U. 2	103
ABB. C 21: KARTON VERBUNDPLATTE 3 U. 4 (VERSCHRAUBUNG)	104
ABB. C 22: KLEBEMUSTER.....	105
ABB. C 23: DEKONSTRUKTION P2.....	108
ABB. C 24: DEKONSTRUKTION P2.....	109
ABB. C 25: DEKONSTRUKTION P3.....	110
ABB. C 26: DEKONSTRUKTION P3.....	110
ABB. C 27: DEKONSTRUKTION P4.....	111
ABB. C 28: DEKONSTRUKTION P5.....	112
ABB. C 29: DEKONSTRUKTION P6.....	113

Tabellenverzeichnis RB

TAB. C 1: ÖKOBILANZ VON PAPIER- UND HOLZWERKSTOFFEN [BKH20] [BUN21]	58
TAB. C 2: VERGLEICH VON DÄMMSTOFFEN BEI GLEICHEM U-WERT [UBA23]	59
TAB. C 3: WANDAUFBAU PROTOTYP 1	62
TAB. C 4: WANDAUFBAU PROTOTYP 2.....	64
TAB. C 5: WANDAUFBAU PROTOTYP 3.....	65
TAB. C 6: WANDAUFBAU PROTOTYP 4.....	66
TAB. C 7: WANDAUFBAU PROTOTYP 5.....	67
TAB. C 8: WANDAUFBAU PROTOTYP 6.....	68
TAB. C 9: VERGLEICH KARTONVERBUNDPLATTE UND OSB-PLATTE	104
TAB. C 11: KLEBEMUSTER/HAFTKRAFT	106
TAB. C 10: KLEBEMUSTER/HAFTKRAFT	106
TAB. C 12: EVALUATION PROTOTYPEN.....	107
TAB. C 13: DEKONSTRUKTION P2	108
TAB. C 14: DEKONSTRUKTION P3	109
TAB. C 15: DEKONSTRUKTION P4	111
TAB. C 16: DEKONSTRUKTION P6	113

1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurden diverse Lösungsansätze zum Bau eines temporären Papier-Hauses untersucht. Im Zuge der Untersuchungen haben die Forschungspartner gemeinsam und interdisziplinär ein Entwurfskonzept für ein Wohnhaus erarbeitet. Dabei sind am Markt verfügbare Papierwerkstoffe berücksichtigt worden, um ein sinnvolles Maß in der Verwendung von Papier als Baustoff herauszufinden.

Bei der Untersuchung der Konstruktionsweisen haben die beteiligten Institute die zuvor skizzierten Bauweisen jeweils anhand ihrer eigenen Expertise weiterentwickelt und bewertet. Während durch die TU Darmstadt vor allem statisch-konstruktive Belange betrachtet wurden, widmete sich die TU Braunschweig bauklimatischen Fragestellungen und die RWTH Aachen den ökologischen Aspekten des Vorhabens. Interdisziplinär wurden verschiedenartige Außenwandkonstruktionen aus Papierwerkstoffen entwickelt. Die vertiefte Betrachtung der aus den unterschiedlichen Blickrichtungen entwickelten Wandaufbauten aus Papierbaustoffen hat zum Ziel, eine allgemeine Einordnung betreffend Konstruktion und Tragwerk (vgl. Abschnitt 3.1, 4.1 und 5.1), der bauklimatische Performance (vgl. Abschnitt 3.2, 4.2, und 5.2), sowie ökologischer Aspekte (vgl. Abschnitt 3.3, 4.3 und 5.3) von Papierbaustoffen vorzunehmen. Darauf fußend, wird eine Einschätzung betreffend des Potenzials von Papierwerkstoffen in Fassadenkonstruktionen vorgenommen.

Dies erfolgte unter der Berücksichtigung der Voruntersuchungen des Architekturbüro studio5a. Dabei wurden unterschiedliche Gebäudekubaturen, sowie Konstruktionsweisen skizziert, welche aussichtsreich für eine Ausführung erschienen. Nachdem sich früh auf einen architektonische Formgebung geeinigt werden konnte, wurden die Konstruktionsweisen eingehend auf ihre Eigenschaften und die damit verbundene Eignung zur Ausführung untersucht. Der finale Planungsstand sieht ein Haus in Nur-Dach-Typologie vor, welches in einer an den Holzrahmenbau angelehnten Konstruktionsweise errichtet werden soll. Die Evaluierung der betrachteten Konstruktionsweisen erfolgte durch den Bau von Mock-Ups und Prototypen, Simulationen, sowie experimentell an klein- bis mittelformatigen Probekörpern. Aus diesem Vorgehen konnten Handlungsempfehlungen für die Weiterführung des Vorhabens abgeleitet werden, welche in einem Folgeprojekt auch in die Errichtung eines Wohngebäudes aus Papier münden soll.

Baukonstruktion

Das Augenmerk der Baukonstruktiven Untersuchungen lag auf der tektonischen sowie statischen Umsetzbarkeit der vorgeschlagenen Konstruktionen. Dies betrifft die Ausgestaltung von Bauteilfügungen und -anschlüssen, sowie die Stabilität des Tragwerks. Auch der vorbeugende Brandschutz war Teil der Untersuchung, da diesbezüglich eine enge Vernetzung mit Fragestellungen zu den Themen Fügung und Tragwerk bestehen. Als Referenzobjekte wurden konventionelle Bauweisen und Materialien aus dem Holzbau herangezogen, um eine Vergleichbarkeit mit dem „neuen“ Material Papier zu schaffen.

Bauklimatik

Der Fokus der bauklimatischen Betrachtung lag auf der Annäherung an die physikalischen Eigenschaften von Papier und einer ersten Einordnung der bauklimatischen Performance von Papierkonstruktionen. Bei der Bewertung der Fassadenkonstruktionen stand der (1) sommerliche Wärmeschutz und die (2) Innenraumluftqualitäten mit dem Fokus auf Feuchtigkeit im Zentrum. Dafür wurde ein konventioneller Holzleichtbau und ein konventioneller Massivbau als Referenz herangezogen. Da nicht alle notwendigen physikalischen Parameter als Herstellerdaten vorliegen und vor dem Hintergrund, dass die physikalischen Eigenschaften eines Produktes je nach Hersteller stark variieren können, wurde ein für die Berechnungen und Simulationen Annäherungswerte hergeleitet.

Zirkularität

Von RB wurden zunächst die ökologischen Eigenschaften von Papier untersucht. Dabei steht die Herstellung und die Nachnutzungsmöglichkeit im Vordergrund. Es zeigt sich, dass Papierwerkstoffe Treibhausgase binden und damit negative Ökobilanzwerte aufweisen. Diese verbessern sich mit wachsendem Anteil von Sekundärmaterial. Die Nachnutzungsmöglichkeit wird durch die Lösbarkeit auf dem Verbund und der Trennbarkeit der Schichten bestimmt. Hier wurden verschiedene Bindemittel untersucht. Stärkebasierte Klebstoffe zeigen die beste Performance für Haftkraft während der Nutzung und Lösbarkeit danach.

Ermöglicht wurde das Projekt durch die Förderung der Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 37048/02-25. Das Forschungsvorhaben wurde kooperativ im Konsortium, bestehend aus dem *Institut für Bauklimatik und Energie der Architektur* der TU Braunschweig, der *Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen* der RWTH Aachen und dem *Institut für Statik und Konstruktion* der TU Darmstadt, durchgeführt. Das Konsortium wurde vom Architekturbüro *studio5a*, sowie den Firmen *Papier- u. Kartonfabrik Varel GmbH*, *Thüringer Fiber-Trommel GmbH* und *Wellpappe Alzenau GmbH & Co. KG* als Industriepartner unterstützt.

2 Ausgangslage

Der Bausektor gilt aufgrund seines hohen Ressourcenbedarfs und der dadurch emittierten Treibhausgase als einer der am ökologisch problematischsten Industriezweige [Nab20]. Die Nutzung von Baumaterialien endet nach Ablauf der Nutzungsdauer auf Deponien, einige erfahren ein Downcycling und werden als Unterbau für Straßen oder auch als Brennstoff in einem Müllheizkraftwerk verwendet, jedoch werden die wenigsten dem Stoffkreislauf erneut sinnvoll zugeführt.

Die Suche nach umweltverträglichen Bauweisen und -Materialien wurde im Rahmen einer sich ihrer ökologischen Herausforderungen bewusstwerdenden Gesellschaft zu einer der Kernfragen der Bauforschung [Umw23]. Als gutes Beispiel für ein kreislaufgerechtes Material kann Papier herangezogen werden. Bei seiner breiten Produktpalette, welche vom Schreibpapier bis hin zu stabilen Verpackungsmaterialien reicht, wird heutzutage eine Recyclingquote von bis zu 79% erreicht [Umw22a].

Im nationalen Forschungskontext wird Papier vor allem für Tragwerksstrukturen untersucht und zum Teil auch verwendet. In den klimatischen Bedingungen Mitteleuropas sind nur vereinzelte gebaute Beispiele häufig mit experimentellem Charakter zu finden. Als gebaute Beispiele könne folgende vier Projekte genannt werden:

- Projekt PH-Z2 von Dratz Architekten, aus dem Jahr 2008 (bis 2010) als temporärer Pavillon im Rahmen des Welterbe Zollverein in Essen [Bau10].
- Westborough Grundschule in London von Dr. Andrew Cripps, (Buro Happold Consulting Engineers) zusammen mit Cottrell and Vermeulen Architects aus dem Jahre 2001 [CV01].
- Das „Wikkelhouse“ entwickelt von Fiction Factory in Amsterdam und aufbauend auf einer Idee von Rene Snel, welches seit 2012 als „Fertighaus“ hergestellt wird [Fic23].

Alle genannten Projekte verwenden zu gewissen Anteilen Papier als Baustoff. Das Projekt PH-Z2 sowie die Infozentrale am Sudhaus stellen nur geringe Anforderungen an die Klimahülle. Das „Wikkelhouse“ ersetzt vor allem die Dämmschicht. Der Fassadenaufbau kann als klassischer Leichtbau beschrieben werden.

Dabei wurden die Eigenschaften, wie Widerstandsfähigkeit gegenüber Feuer und Wasser häufig durch feste Verbünde mit anderen Produkten verbessert. Zwar konnte dadurch die Dauerhaftigkeit der Papierkonstruktionen weiterentwickelt werden, allerdings ergaben sich Einschränkungen zu Lasten der Zirkularität. Durch das Aufbringen von Kunststoffen beispielsweise, konnten die Produkte nicht mehr in den Aufbereitungsprozess eingeführt werden, sondern endeten als Müll.

Nachdem es in den letzten Jahrzehnten bereits diverse Vorstöße zur Nutzung von Papier als Baustoff gab [Lat17], wurden ab 2015 im Rahmen des LOEWE-Projekts BAMP! (Bauen mit Papier) erstmals Anstrengungen unternommen dies auch wissenschaftlich zu untersuchen. Nachdem die Grundlagenforschung [BKH20] [Kan21] [Kiz23] abgeschlossen werden konnte, konnte im Herbst 2020 ein erstes kleineres Prototypengebäude errichtet werden [WBK21], welches nachfolgend unter Realbedingungen getestet wurde.

Die vielversprechenden Ergebnisse führten zum Wunsch auch ein bewohnbares Gebäude zu errichten, in dem das neu erschlossene Baumaterial sowohl in Hinsicht auf seine Verwendung bei der Konstruktion als auch im Gebäudebetrieb mit Blick auf seinen bauphysikalischen Komfort weiter untersucht werden kann. So sind neben der Frage nach der erforderlichen Stabilität auch Themen wie der vorbeugende Brandschutz und das Raumklima von zentraler Wichtigkeit für seine Erschließung als Baumaterial. Besonderes Augenmerk fällt auf die Kreislauffähigkeit. Sie ist eines der wichtigsten Argumente für die Weiterentwicklung von Papier zu einem zeitgemäßen Baustoff, der dem wachsenden Bedarf nach umweltschonenden, neuen Bauweisen gerecht wird und es sollten Bauweisen gefunden werden, die ein Recycling auch weiterhin ermöglichen.

Um die bisher gewonnenen Erkenntnisse in einen breiteren baulichen Kontext einzuordnen und weiterzuentwickeln, wurde ein Forschungskonsortium bestehend aus dem *Institut für Bauklimatik und Energie der Architektur* der TU Braunschweig, der *Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen* der RWTH Aachen und dem *Institut für Statik und Konstruktion* der TU Darmstadt gebildet. Die Untersuchungen erfolgten mit der Unterstützung diverser Industriepartner, wie der *Papier- u. Kartonfabrik Varel GmbH*, der *Thüringer Fiber-Trommel GmbH* und der *Wellpappe Alzenau GmbH & Co. KG*, sowie dem Architekturbüro *studio5a*.

Das Projektziel ist die integrale Planung eines Hauses aus Papier, welches in einer zweiten Phase errichtet werden soll. Das Zusammenwirken von unterschiedlichen Expertisen aus den Bereichen Ökologie (RB), Bauklimatik (IBEA) und Konstruktion (ISMD) gibt der Planung einen entscheidenden Vorteil in Richtung der Umsetzbarkeit. Das so geplante Papierhaus wird als temporäres Gebäude am Standort Darmstadt entstehen und wegweisend für die Einführung papierbasierter Bauweisen sein.

2.1 Konzeption eines temporären Hauses aus Papier

In Ergänzung zu der im Projektantrag enthaltenen Entwurfsskizze werden im folgenden Abschnitt die Entwicklung von drei weiteren Varianten gezeigt. Diese erfolgten in Zusammenarbeit mit studio5a und unterscheiden sich sowohl im Hinblick auf ihr Raumprogramm, als auch ihre Kubatur (vgl. Anh1_Vorentwurf). Der Ansatz einer Tiny-House-Nutzung zur Vermietung an Studierende oder GastwissenschaftlerInnen werden beibehalten.

Variante 1 stellt eine Giebelhaus-Typologie dar und bietet den Bewohnenden neben einem Gemeinschaftsraum mit Pantryküche ein Bad, sowie zwei Individualräume mit Bett, Schrank und Schreibtisch. Die Außenmaße betragen ca. 10m x 5,5m x 6m bei einer Netto-Grundfläche von ca. 49m².

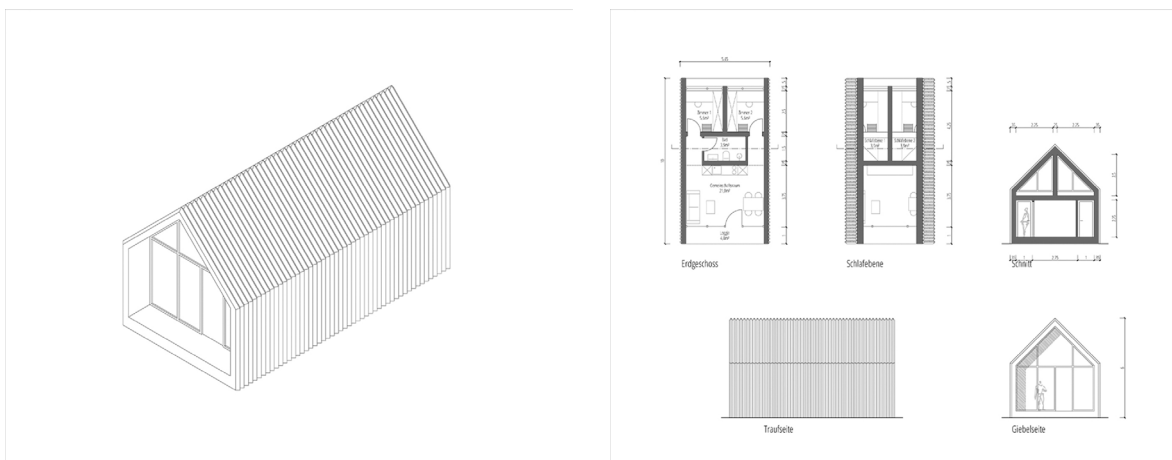


ABB. B 1: Axonometrie und Pläne Variante 1

Variante 2 stellt eine Nurdachhaus-Typologie dar und bietet seinem Bewohner neben einem Wohnraum eine Küche, ein Bad und eine Abstellkammer. Auf einer Hochebene über dem Wohnraum befindet sich die Schlafebene. Die Außenmaße betragen ca. 8m x 7,5m x 7,5m bei einer Netto-Grundfläche von ca. 50m².

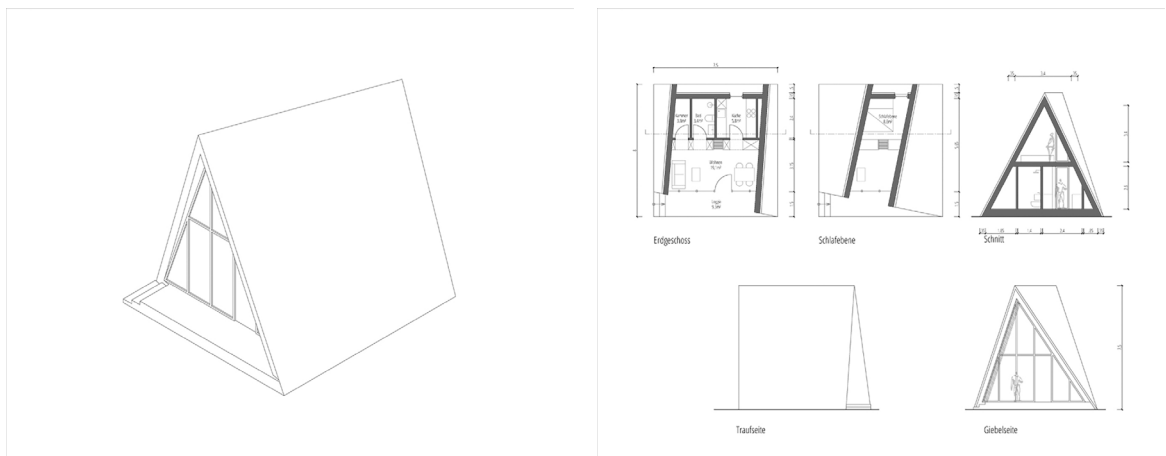


ABB. B 2: Axonometrie und Pläne Variante 2

Variante 3 stellt eine Nurdachhaus-Typologie mit polygonalen Dachflächen dar und bietet seinen Bewohnern eine Küche, ein Bad, sowie zwei Individualräume mit Schrank, Schreibtisch und einer Sitzecke. Auf Hochebenen über den Individualräumen befinden sich die Schlafebene. Die Außenmaße betragen ca. 11,5m x 7,5m x 7,9m bei einer Netto-Grundfläche von ca. 100m².

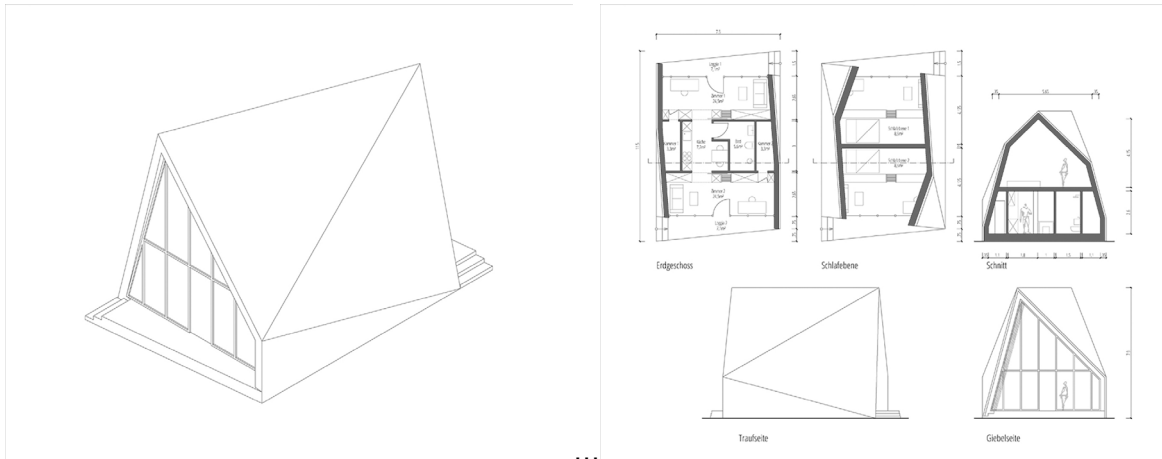


ABB. B 3: Axonometrie und Pläne Variante 3

Variante 4 stellt eine Kuppel-Typologie mit polygonalen Dachflächen dar und bietet seinem Bewohner eine Wohnküche, ein Bad, sowie ein Schlafzimmer. Die Außenmaße betragen ca. 7,9m x 7,9m x 4,5m bei einer Netto-Grundfläche von ca. 38,8m².

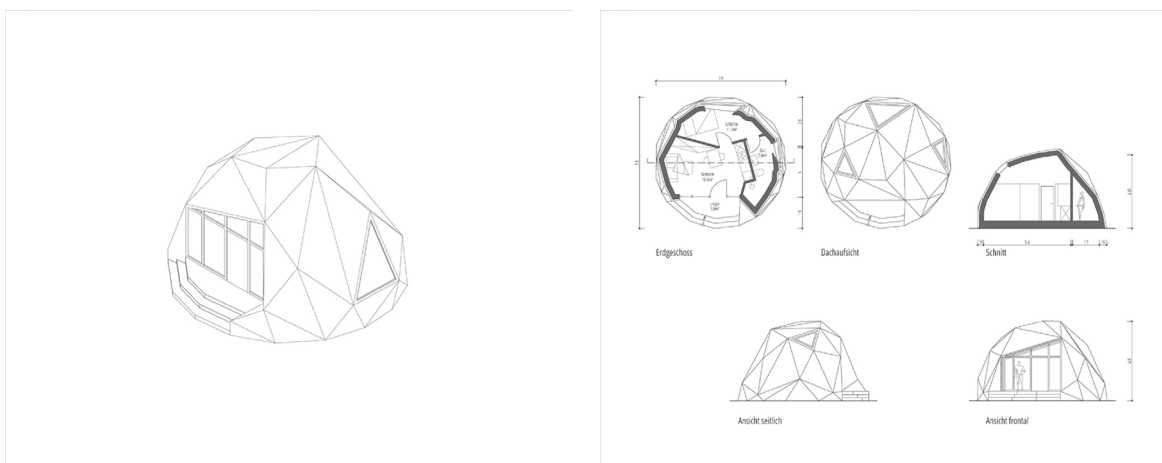


ABB. B 4: Axonometrie und Pläne Variante 4

Hinsichtlich der Kubatur wurde sich zunächst auf eine Weiterverfolgung der Nurdachhaus-Varianten geeinigt. Mit ihrer zeitgenössischen architektonischen Formgebung soll die gesellschaftliche Akzeptanz der Thematik des Bauens mit Papier gefördert werden. Im Gegensatz zu Variante 2 ist in Variante 3 eine wandartige Hüllfläche im Sockelbereich vorhanden, wodurch auch die bauphysikalische Betrachtung derartiger Bauteile ermöglicht wird. Zudem verspricht das Vorhandensein zweier gleichförmiger Privaträume später eine differenziertere Auswertung des Nutzerverhaltens im Kontext der jeweils individuellen Komfortbedürfnisse. Da Variante 3 durch diese Merkmale einen größeren Erkenntnisgewinn verspricht, wurde sie schlussendlich zur Vorzugsvariante erklärt.

Ebenfalls wurden verschiedene Bauteilaufbauten erarbeitet, die für eine weitere Untersuchung in Frage kamen (vgl. Anh2_Konstruktionstypen).

Diese umfassen:

Typ 1 Wand-/Dachaufbau aus dem Vorgängerprojekt [WBK21] welcher jedoch aufgrund seiner aufwändigen Fertigung und komplizierten Rezyklierbarkeit nicht weiterverfolgt werden soll und im Weiteren lediglich als Referenzwertgeber für die Entwicklung der weiteren Konstruktionen dienen wird.

Typ 2 In Anlehnung an den schon bautechnisch etablierten Holzständerbau wurde eine Konstruktion erarbeitet, welche dessen tektonischen Regeln folgt, jedoch die üblichen Komponenten durch Bauteile aus Papier ersetzt. Insbesondere hinsichtlich der Fügungen wurde sich auf eine Dissertation zum Bauen mit Papierröhren bezogen [BKH20].

Typ 3 Zudem wurde eine Variante auf Basis einer weiteren Dissertation [Kan21] angedacht, welche sich tektonisch als "beplankter Palisadenzaun" beschreiben lässt. Die hierzu verwendeten Papprohre sollen zum Zweck der thermischen Isolierung später mit Zelluloseflocken gefüllt werden.

Typ 4 Des Weiteren wurde ebenfalls eine elementierte Holz-Papier-Sandwich-Konstruktion diskutiert, welche sich durch einen hohen Vorfertigungsgrad auszeichnet und für eine schnelle Errichtung des Rohbaus sorgen könnte.

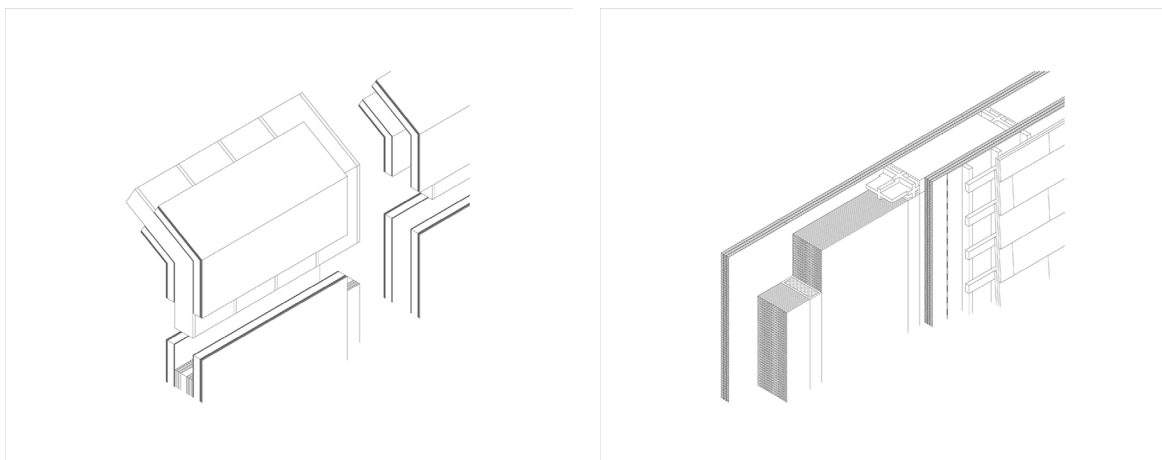


ABB. B 2: Mögliche Bauteilaufbauten Typ 1 (links) und 2 (rechts) in AP1

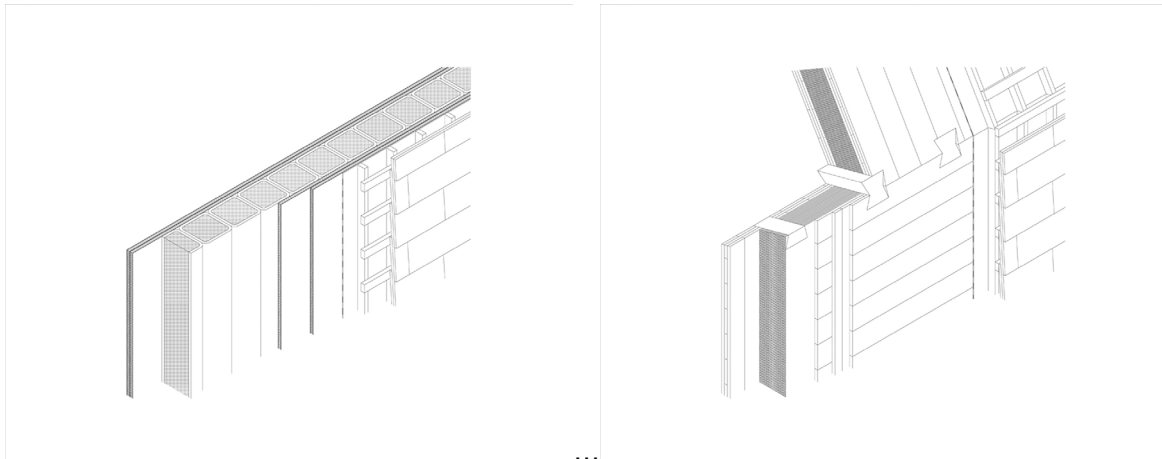


ABB. B 3: Mögliche Bauteilaufbauten Typ 3 (links) und 4 (rechts) in AP1

Um eine holistische Bewertung der unterschiedlichen Kriterien zu ermöglichen, wurde eine Bewertungsmatrix aufgestellt. Diese beinhaltet eine quantitative wie qualitative Bewertung hinsichtlich der drei Designanforderungen: Konstruktion, Bauklimatik und dem rezykliergerichten Bauen sowie einer allgemeingültigen Bewertung an die vier zu untersuchende Konstruktionstypen (Typ 1 - Typ 4).

3 Fragestellung und Anforderungen

3.1 Gestaltung, Konstruktion, Statik, Fassade (ISMD)

Auf Grundlage der drei entwickelten Konstruktionstypen (vgl. Kap. 3.1.) wurden die jeweiligen Untertypen 2A, 2B, 3A, 3B, 4A und 4B definiert, welche neben der ausschließlichen Verwendung von Papier auch einen begrenzten Einsatz anderer ökologisch unbedenklicher Baustoffe (Holz, Holzwerkstoffe, Lehmwerkstoffe, ...) in Erwägung ziehen. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf den Wand- beziehungsweise Dachflächen, da diese den größten Anteil an der Hüllfläche haben. Für alle Typen wurde eine spätere Adaptierbarkeit der Konstruktionsweise auf die Bodenplatte unterstellt.

Die Untertypen wurden zunächst auf ihre Eigenschaften im Hinblick auf die Wärmedämmung betrachtet, da erwartet wurde, dass sich diese Anforderungen gravierender auf die Stärke des Bauteilaufbaus auswirken würden, als statisch-konstruktive Erfordernisse. Als Referenz wurde erneut der im Vorgängerprojekt [WBK21] erarbeitete Bauteilaufbau (Typ 1) herangezogen. Da der in AP1 entwickelte Gebäudeentwurf jedoch zu einem überwiegenden Teil auf Dachflächen besteht, musste jedoch ein U-Wert von $\leq 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ als Zielvorgabe für die neuen Konstruktionen angesetzt werden um den Ansprüchen des Gebäudeenergiegesetz (GEG) [Bun20] gerecht zu werden.

Nachfolgend wurden Bauteilaufbauten und Schichtfolgen erarbeitet, welche diesen Ansprüchen in einem Worst-Case-Szenario, definiert durch einen 4-fachen Elementstoß auf einer Fläche von 2x2m gerecht werden (vgl. Anh3_Dimensionierungen). Bei der verwendeten Karton-Verbundplatte handelt es sich um ein neu konzipiertes Bauteil, welches als laminiertes Verbund aus je einer Vollpappe als Außenlage und zwei Wellpappen als Kernlage hergestellt wird.

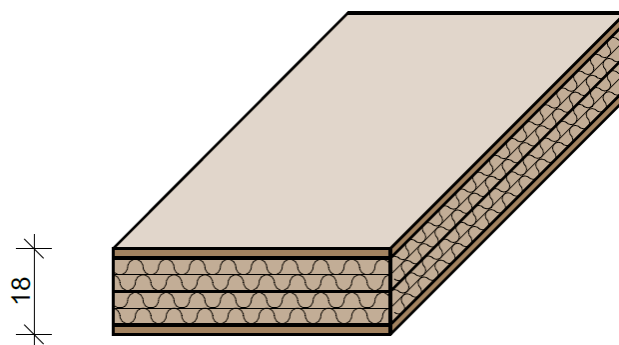


ABB. B 4: Karton-Verbundplatte



ABB. B 5: Typenübersicht Dimensionierung

Während Untertyp 2A mit einem Ständerwerk aus Papprohren, einer Gefachdämmung aus Wellpappen und einer Beplankung aus Karton-Verbundplatten vollständig aus Papierwerkstoffen besteht, wurde in Typ 2B ein Ständerwerk aus Konstruktionsvollholz, sowie eine außenseitige Beplankung mit einer Holzwerkstoffplatte vorgesehen. Da im Holzrahmenbau der Verbund der Ständer mit ihrer Beplankung das statisch wirksame System darstellen stellte dies die Fallback-Variante für Typ2 dar, auf die zurückgegriffen werden könnte, wenn Typ2A sich als nicht ausreichend standfest herausstellen würde. Zudem bieten Holzständer eine für Schraubverbindungen in der Beplankung vorteilhaftere Unterkonstruktion als Papprohren und auch die Verbindung von Ständern zu Schwellen und Riegeln lässt sich unkomplizierter ausführen als im Falle von Papprohren untereinander [Kan21].

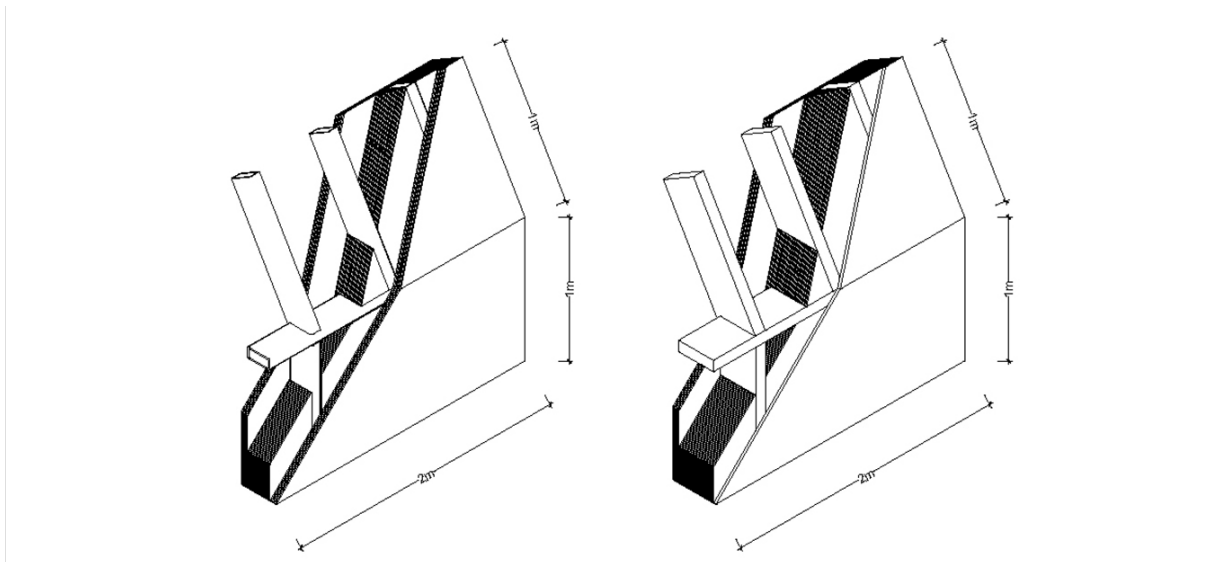


ABB. B 6: Dimensionierung TYP 2A + B

Ähnlich wie schon bei den Konstruktionen des Typs 2 wäre für Typ 3A und 3B eine Beplankung von Nöten, um die Queraussteifung der Konstruktion zu gewährleisten. Während Typ 3A dem ursprünglichen Typ 3 entspricht, würde für 3B eine innenseitige Beplankung mit einer Lehmbauplatte angedacht. Zudem soll der zweilagige, versetzte Einbau der Röhren im Kernbereich einerseits den Verbund stärken, andererseits durchlaufende Wärmebrücken an den Stößen zweier Röhren verhindern.

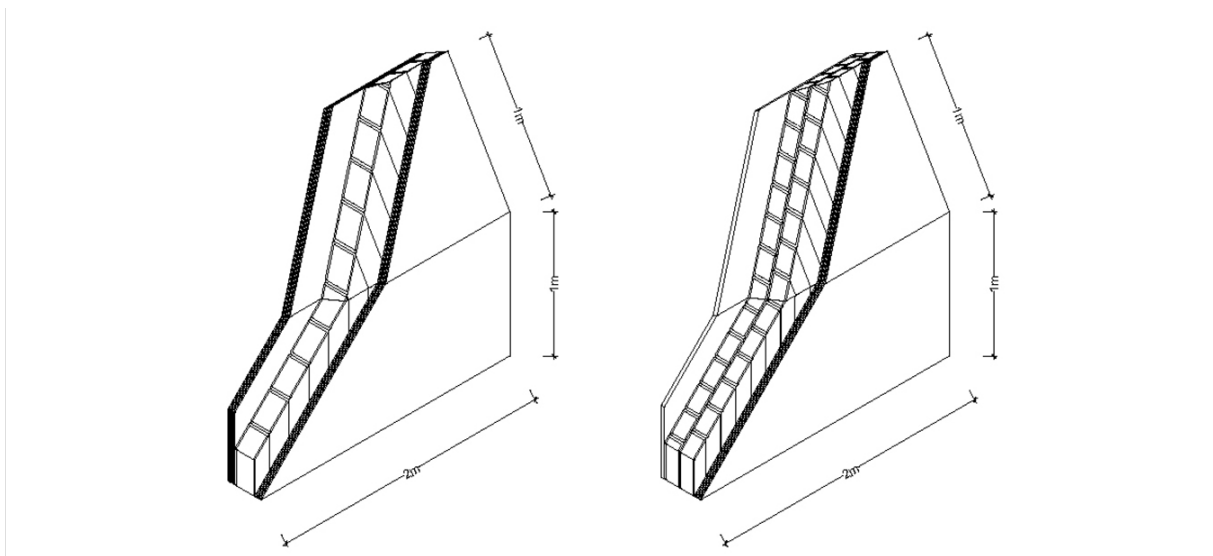


ABB. B 7: Dimensionierung TYP 3 A + B

Die Typen 4A und 4B unterscheiden sich lediglich in ihrer äußersten Lage. Während 4A vollständig von Holz umschlossene Sandwichelemente mit einem Kern aus Wellpappe vorsieht, ist für 4B eine Außenlage aus einer Karton-Verbundplatte angedacht, welche für einen größeren Papieranteil in der Konstruktion sorgen soll.

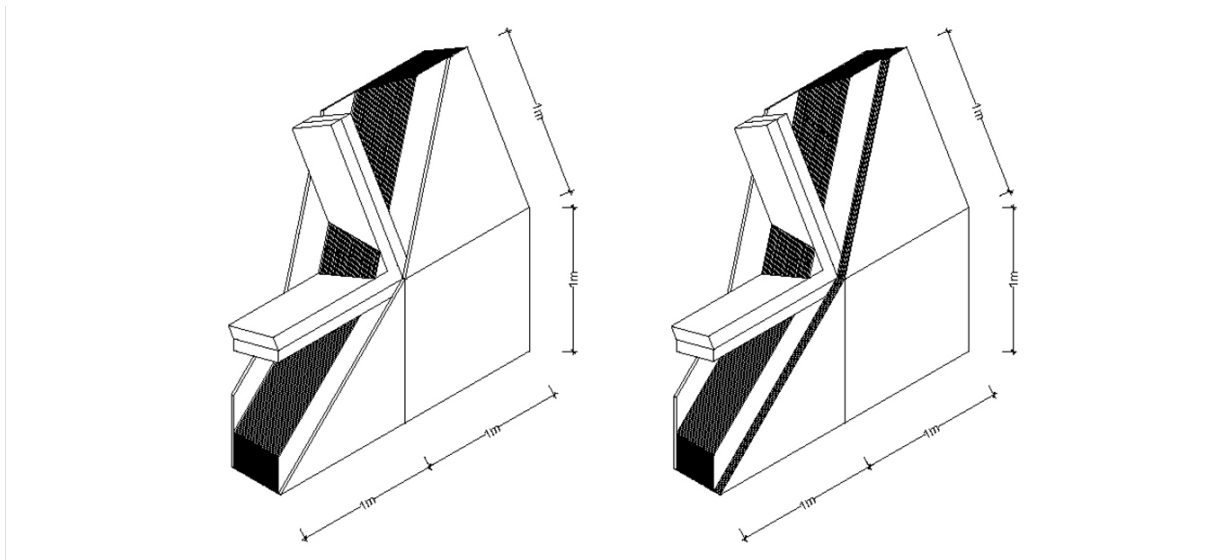


ABB. B 8: Dimensionierung TYP 4 A + B

Bezüglich der Tragfähigkeit ist allen 6 Typen gemein, dass die Kernschichten, ob es nun Röhren oder Holzbalken sind, die Druck- und Biegekräfte der Konstruktion aufnehmen werden. Während für Konstruktionsvollholz als konventioneller Baustoff bereits Materialwerte und Rechenmodelle zur Verfügung stehen, wären solche für Pappröhren noch zu ermitteln. Die Bekleidung wiederum wird einen signifikanten Anteil an der Queraussteifung der Konstruktion einnehmen. Hier bestehen für die bereits marktverfügbaren Optionen wie Holzwerkstoff- oder Lehmbauplatten ebenfalls bekannte Materialwerte und Rechenmodelle, die für die Karton-Verbundplatte hingegen auch erst noch zu ermitteln wären.

Im Hinblick auf die äußere Gebäudehülle wurde sich darauf verständigt, dass schon wie im Vorgängerprojekt einzig eine vorgehängte, hinterlüftete Fassade erfolgversprechend scheint. Die Funktion einer wasserdichten Ebene soll hierbei in allen Konstruktionstypen von einer Folienbahn übernommen werden, die jedoch mit besonderem Blick auf eine spätere sortenreine Trennung auszuwählen ist (vgl. 5.3.3.).

Hinsichtlich des Bekleidungsmaterials wurde aufgrund von negativen Ergebnissen mit direkt bewitterten Papierfassaden im Vorgängerprojekt eine Entscheidung zunächst hintenangestellt. Die Verwendung einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade ermöglicht dem Grunde nach eine freie Auswahl der Bekleidung, da diese nicht integraler Bestandteil der Konstruktion ist. Lediglich sehr schwere Materialien, wie Zementfaserplatten oder Naturstein, scheiden durch die Anforderungen an die Befestigung der Unterkonstruktion aus.

Ebenfalls wurde die Thematik der Fensteranschlüsse in Wand- und Dachflächen zurückgestellt, da die aus AP1 vorliegenden Entwürfe keine Lochfenster vorsehen, sondern nur den Einsatz vollflächiger Glasfassaden an den Stirnseiten

3.2 Bauklimatik (IBEA)

3.2.1 Papier als Baustoff

Betrachtet man die (bau-)physikalischen Parameter von Papier kann nicht von „dem Papierbaustoff“ gesprochen werden. Die physikalischen Eigenschaften sind je nach verwendetem Faserstoff, Herstellungsverfahren, Zuschlagstoffen und Oberflächenbehandlung sowie der Verarbeitung zu unterschiedlichen Produkten (Vollpappe, Wellpappe, Wabenpappe) äußerst heterogen [BKH20]. Betreffend die bauphysikalischen Eigenschaften ist Papier bislang wenig untersucht, sodass sich detaillierte Angaben auf einzelne Produkte beschränken. Für diese Arbeit kann deshalb auf wenige verifizierten bauphysikalische Werte zurückgegriffen werden.

In der Bauindustrie findet man teilweise Baustoffe aus Papier. Spezialisiert auf Trockenbausysteme und Schallschutz wird ein System für Fußbodenheizungen, sowie eine Trockenbauplatte aus Wellpappe gefüllt mit Sand als Schallschutzplatte angeboten [Wol23]. Ein weiteres Produkt ist eine Dämmplatte aus Wellpappe [Bet23]. Die Verpackungsindustrie hält eine umfangreiche Datengrundlage, betreffend der statischen Eigenschaften von Papier (Zugspannung, Druckspannung usw. bereit (vgl. Kap 3.1). Angaben betreffend der für die Bauklimatik relevanten Materialeigenschaften sind nur vereinzelt dokumentiert. Außerdem stellen die genannten Produkte Einzelfälle für bauphysikalische Anwendungen dar. Fundierte bauphysikalische oder bauklimatische Grundlagen für das Bauen mit Papier sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vorhanden. Deshalb sind auch die physikalische Materialeigenschaften, die zu einer bauphysikalischen oder gar bauklimatischen Bewertung notwendig sind nur selten von Herstellerseite angegeben. Ziel dieses Forschungsprojekts ist es Papier als Baustoff generell einordnen zu können und so eine Basis für die Entwicklung eines Entwurfs eines Nur-Dach-Wohnhauses zu leisten. Dafür sind aus Sicht der Bauklimatik folgende Materialeigenschaften von zentraler Bedeutung:

- Rohdichte ρ [kg/m³]
- Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m K)]
- Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-]
- Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]
- Porösität [%]
- Wassergehalt [kg/m³]
- Porenradius [m]

Bis auf die Rohdichte sind die oben genannten Materialeigenschaften bei Papier nicht oder nur vereinzelt als Kennwert von Produktdatenblättern dokumentiert. Einige Werte für die Wärmeleitfähigkeiten sowie der Wasserdampfdiffusionswiderstand sind in Bach (2020) [BKH20] dokumentiert. Bach bemisst mittels eines Einplatten-Wärmeleitfähigkeits-Messgerätes Durchschnittswerte für Vollpappen und Wellpappen. In Abhängigkeit der Rohdichte werden dadurch tendenzielle Zusammenhänge zur Wärmeleitfähigkeit ableitbar. Aus dem Zusammenhang der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit werden Parameter von Papierwerkstoffen ermittelt. Bei der Untersuchung zum Wasserdampfdiffusionswiderstand konnten aufgrund des Messaufbaus nur Werte für das Wet-Cup Verfahren ermittelt werden. Dies erschwert den Vergleich der Werte mit

konventionellen Baustoffen. Die Analyse für Wellpappen musste zudem errechnet werden, da das Material zu dick für die Prüfschalen war. Betreffend der Rohdichte und dem Wasserdampfdiffusionswiderstand kann ein ähnlicher Zusammenhang beobachtet werden: Umso geringer die Rohdichte umso geringer der Wasserdampfdiffusionswiderstand. Allerdings ist die Diffusionsdurchlässigkeit von Wasserdampf stark von der (wasserdampfdiffusionsgeschlossenen) Beschichtung abhängig, sodass diese Korrelation nur bedingt repräsentativ ist. Für die Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt, dienen die von Bach ermittelten Werte als Orientierungspunkt. Um allgemeingültigere Aussagen treffen zu können, werden diese Werte im Verlauf des Projektes mit Werten von vergleichbaren Materialien verglichen und abstrahiert. Vor allem der Wasserdampfdurchgangskoeffizienten verlangt nach einer genaueren Betrachtung. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Art der Verklebung einzelner Papierwerkstoffen zueinander auf den gesamten Wasserdampfdurchgangskoeffizient hat.

3.2.2 Fragestellung und Methodik

Gegenwertig sind Papierwerkstoffe kaum auf ihre bauphysikalischen Eigenschaften hin untersucht (vgl. Abschnitt 3.2.1). Dies führt dazu, dass in einem ersten Schritt Näherungswerte für die zur bauklimatischen Beurteilung von Papierbaustoffen notwendigen (1) physikalischen Werte erarbeitet werden müssen. In der darauf aufbauenden bauklimatischen Betrachtung liegt der Fokus auf zwei Aspekten: Um Papierbaustoffe für zukünftige Bauaufgaben einzuordnen erscheint die Betrachtung des (2) sommerlichen Wärmeschutzes als zukünftige Herausforderung im Bauwesen fundamental, um einen aktiven Kühlenergiebedarf zu vermeiden. Das Potenzial zur (3) Raumfeuchteregulierung als Beitrag zu einem hygienischen und behaglichen Raumklima ist ein Indikator, um das Potenzial von Papierbaustoffen zu bewerten.

Es stehen folgende Forschungsfragen im Zentrum der Betrachtung der bauklimatischen Prüfung:

- (1) Wie sind Papierbaustoffe generell hinsichtlich der bauphysikalischen Parameter zu beurteilen? (vgl. Abschnitt 5.2.1)
- (2) Haben Papierbaustoffe einen positiven Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz? (vgl. Abschnitt 5.2.2)
- (3) Welchen Einfluss haben Papierbaustoffe auf das Raumklima betreffend Raumfeuchte? (vgl. Abschnitt 5.2.3)

Methodisch wurden die drei oben genannten Fragen wie folgt bearbeitet: Um die bauklimatische Performance von Papierbaustoffen zu bemessen werden schrittweise die (1) physikalischen Eigenschaften von Papier hergeleitet und schließlich verifiziert (vgl. Abschnitt 5.2.1). Auf diese Weise werden die abstrakten Baustoffe *Wellpappe_Gemittelt* und *Vollpappe_Gemittelt* erarbeitet und für die Berechnungen und Simulationen verwendet. Diese abstrakten Baustoffe sind als Näherungswerte durch den Vergleich mit ähnlichen Baustoffen (aus vergleichbaren Holzbaustoffen) sowie eine Sensitivitätsanalyse hergeleitet. Um Aussagen über den (2) sommerlichen Wärmeschutz treffen zu können, wurde ein Standartraum definiert und mittels der hygrothermischen Simulationssoftware

(WUFI plus) verschiedene Wandkonstruktionen untersucht und mit dem in Abschnitt 4.2.3 entwickelten Papierwandaufbau P00_00_00_00 verglichen. Um eine Aussage betreffend der (3) Raumfeuchte und somit die hygrothermischen Prozesse zwischen Wandoberfläche und Raumluft machen zu können, wird eine Klimakammer zur experimentellen Messung des bauklimatischen Verhaltens konzipiert und gebaut. Die Klimakammer ermöglicht es, anhand von 1:1 Mockups der Wandaufbauten anhand von Prüfprozeduren ein bauklimatisches Materialverhalten abzuleiten. Dies erfolgt über kurze Zyklen von mehreren Stunden.

3.2.3 Randbedingungen für die Simulation

Anhand dieser Kenngrößen und ausgehend von der Rohdichte wird durch die Abstraktion der Außenwandkonstruktionen aus Papier ein Bezug auf Konstruktionen mit vergleichbarer Performance geschlossen. Diese Ergebnisse werden im Nachgang durch die explorative Untersuchung in der Klimakammer verifiziert. Die Betrachtung der bauphysikalischen Werte von Papierbaustoffen wurde im Verlauf der Forschungsarbeit schrittweise vertieft.

Randbedingungen für die Simulation
Um die Randbedingungen für die Simulationen in Abschnitt 5.2.1.3 und Abschnitt 5.2.2 zu definieren, wurden zuerst Ausgangsparameter betreffend Lage und Ausrichtung(1), Geometrie und Konstruktion (2), Lüftungskonzept (3), und Interne Lasten definiert. Diese Ausgangsparameter wurden mittels durch eine Sensitivitätsanalyse überprüft und angepasst. Die festgelegten Basisparameter sind die Grundlage für alle weiteren Simulationen. Dabei wird jeweils nur die Fassadenkonstruktion variiert. Der Prozess der Simulationen wird in den folgenden Abschnitten wie folgt erläutert:

Ausgangsvariante → Sensitivitätsanalyse → Basisvariante

3.2.3.1 Ausgangsparameter

(1) Lage und Ausrichtung:

Da in erster Linie der sommerliche Wärmeschutz untersucht wird, ist die Fassade des Standartraumes Richtung Süden ausgerichtet. Für die Klimadaten wurde das Feuchtereferenzjahr in Frankfurt am Main gewählt und auf das Datenset des Testreferenzjahres des Deutschen Wetterdienstes; BMFT-FB-T 86-051; 1986 zurückgegriffen. Die Höchsttemperatur liegt bei 31,4 °C und die Mindesttemperatur -13,7 °C. Was zu einem Mittelwert von 9,4 °C führt. Die Rel. Luftfeuchtigkeit bewegt sich zwischen 24% und 100% und ist im Mittel 77,2%. Frankfurt am Main gehört laut DIN 4108-2 zur Klimaregion C [Deu13]. Weitere Parameter können der Abb A 1 entnommen werden.

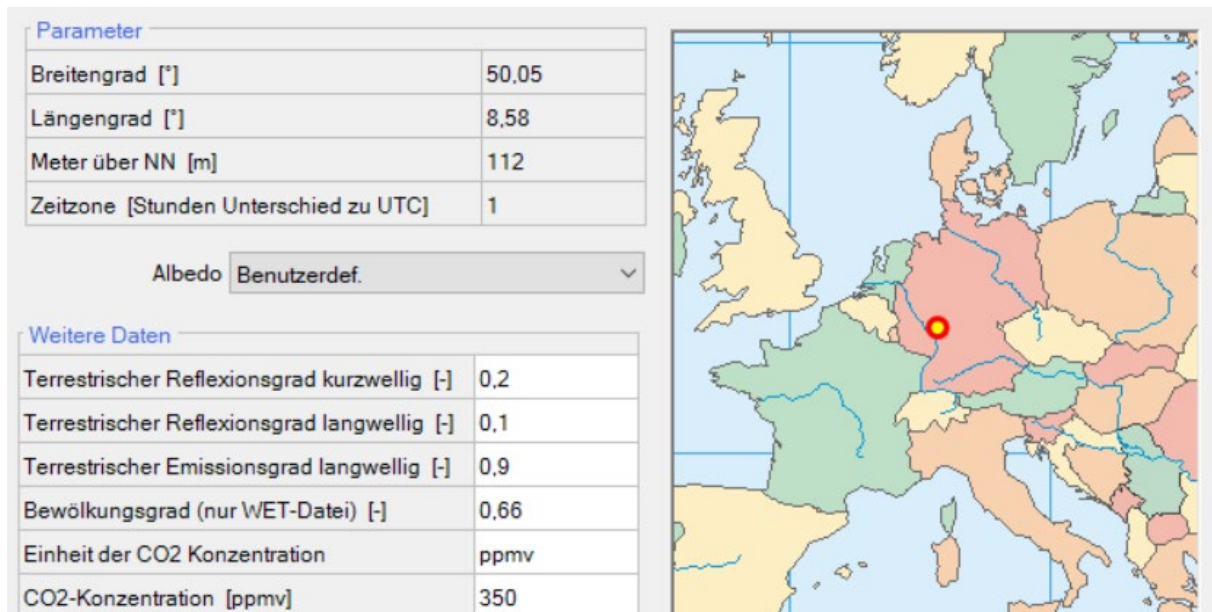


Abb. A 1: Standort Frankfurt am Main

Der Standort wurde gewählt, da das Folgeprojekt in der Region Frankfurt realisiert werden soll.

Die Konditionierung des Raums für den Start der Simulation ist wie folgt:

Bedingung	Wert
Anfangstemperatur	20 °C
Anfangsfeuchte	55 %
Solarstrahlung direkt	0,1
Anfangstemperatur Bauteil	20 °C
Rel. Anfangsfeuchte Bauteil	80 %

Tab. A 1: Randbedingungen, Parameter beim Start der Simulation (Ausgangsvariante)

(2) Geometrie und Konstruktion:

Der „Standarraum“ orientiert sich an einem nutzungsneutralen Zimmer (Schlafzimmer/ Arbeitszimmer/ kleines Wohnzimmer) mit einer Fassade mit Fenster und drei Innenwänden.

Breite	350 cm
Tiefe	450 cm
Lichte Raumhöhe	270 cm
Fläche	15,75 m ²
Raumvolumen	42,50 m ³
Fensterfläche	2,55 m ²
Anteil Fenster an der Fassadenfläche	27 %
Anteil Fassadenfläche (ohne Fenster) an Raumboberfläche	9,5 %

Tab. A 2: Randbedingungen, Raumdimensionen Standarraum

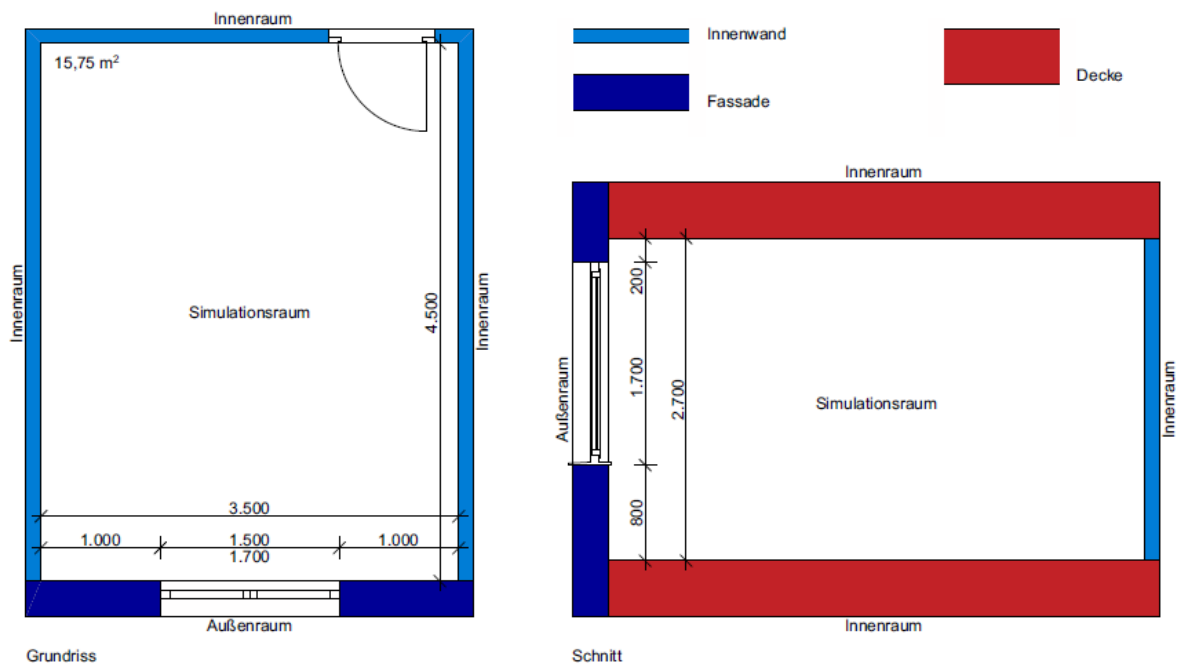


Abb. A 2: Geometrie Standartraum

Die Innenwände und Decken orientieren sich an konventionellen Konstruktionen und sind wie die folgenden Abbildungen zeigen, gewählt worden:

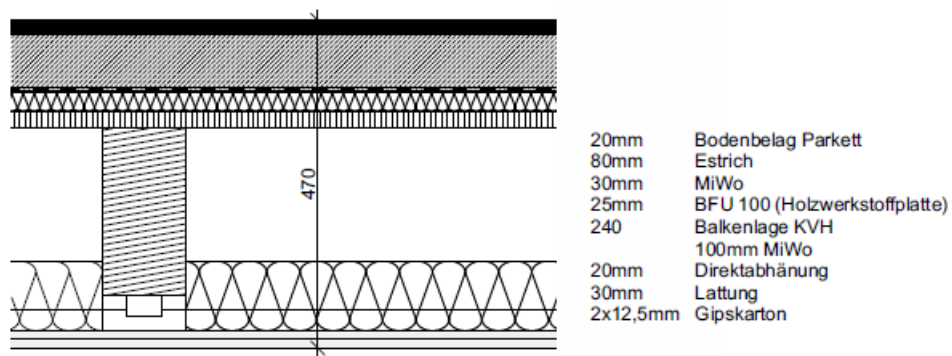


Abb. A 3: Deckenaufbau Standartraum

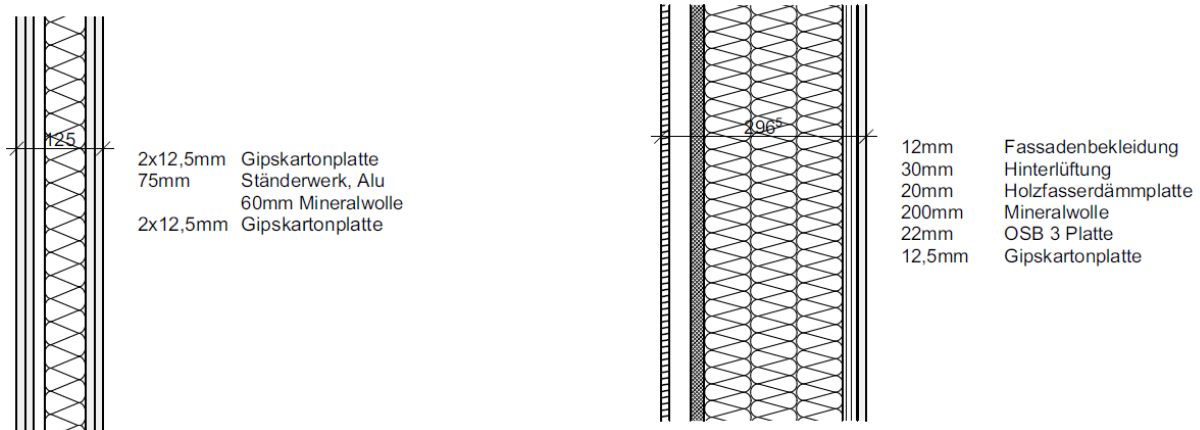


Abb. A 4: Wandaufbau und Fassadenaufbau Standartraum

Das Fenster und damit einhergehende Wärmeverluste- und Gewinne liegt in der Südfassade und wird wie folgt definiert:

Abmessung	150 x 170 cm	
Fensterfläche	2,55 m ²	
U_w-Wert	1,31 W/m ² K	Dreifachverglasung
g-Wert	0,51	
F_c	1	Keine Verschattung

Tab. A 3: Ausgangsparameter Fenster Standartraum

(3) Lüftungskonzept:

Für die Lüftung wurde für jede Stunde ausschließlich der hygienische Mindestluftwechsel von 0,5 1/h sowie eine Infiltration von 0,1 1/h angesetzt.

Art des Luftwechsels	Luftwechselrate	Bedienungen
Infiltration	0,1 1/h	keine
Natürliche Lüftung	0,5 1/h	keine

(4) Interne Lasten:

Um einen Standartraum zu simulieren und somit weder auf konkrete Tagesstrukturen noch auf ein konkretes Nutzerverhalten einzugehen werden die internen Lasten als abstrakt „Dauerlast“ betrachtet. Um die Werte betreffend Wärme konvektiv, Wärme strahlend und Feuchte festzulegen dienten die Werte einer sitzenden Person. Folgende Werte werden festgelegt:

Wärme konvektiv	70 W
Wärme strahlend	30 W
Feuchte	50 g/h
Dauer	24h/ 365d

Tab. A 4: Interne Lasten Standartraum

3.2.3.2 Sensitivitätsanalyse „nutzungsneutraler Standardraum“

A00 Ausgangsvariante

Die Simulation der Ausgangsparameter ergibt, dass 3523 Stunden im Jahr die operative Innenraumtemperatur über 26 C liegt. Dies entspricht über ein Jahr betrachtet 40% der Jahresstunden. Die Max. operative Innenraumtemperatur erreicht 42,4 °C bei einer max. Außentemperatur von 31,4 °C. Es werden 21198 Übertemperaturgradstunden erreicht.

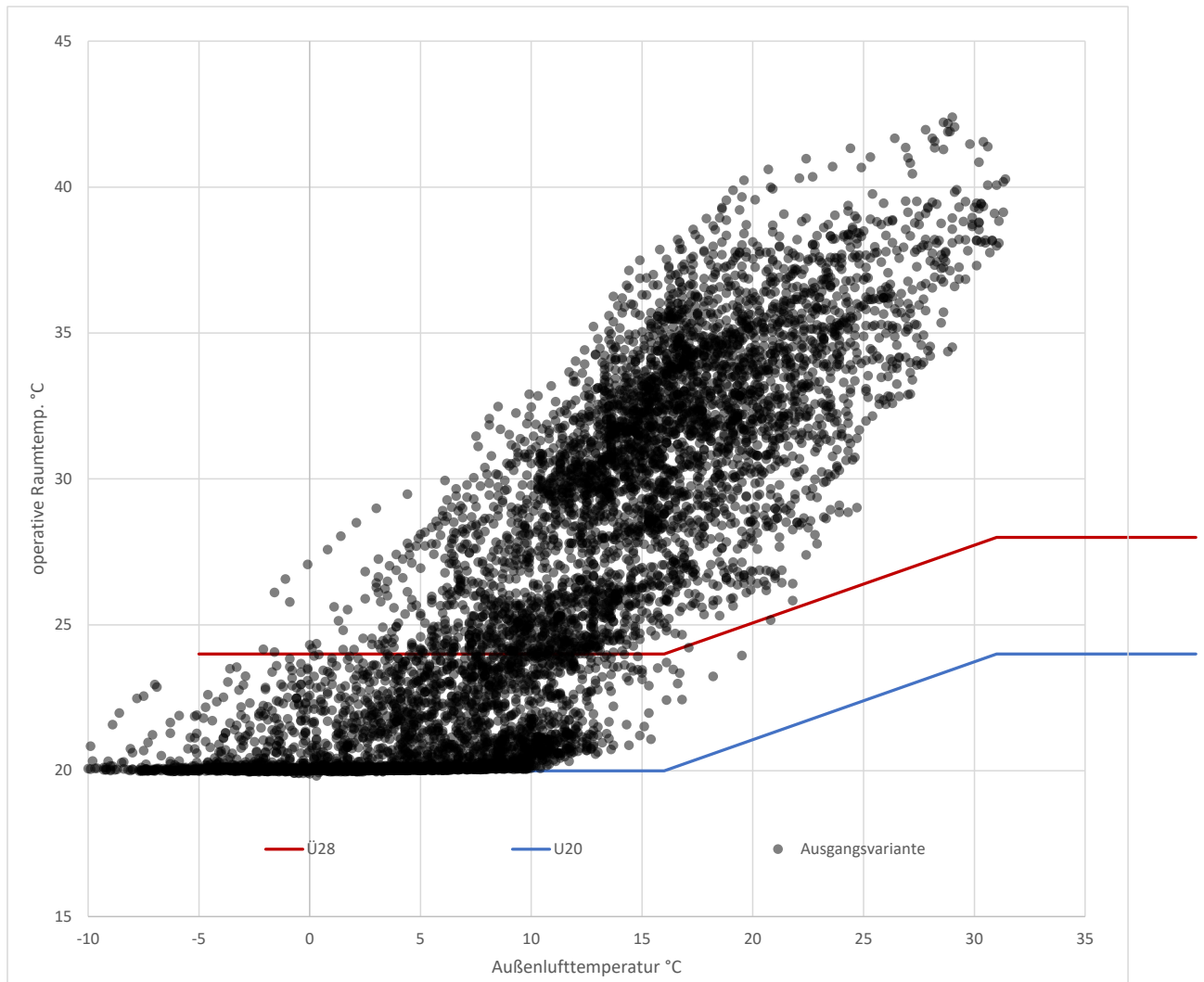


Abb. A 5: Simulation der Ausgangsparameter

Es ist ersichtlich, dass die Ausgangsparameter dazu führen, dass der Raum im Sommer deutlich überhitzt. Mittels Sensitivitätsanalyse soll ermittelt werden, inwiefern die Parameter angepasst werden müssen, damit die Parameter ein repräsentatives Szenario abbilden. Dabei ist festzuhalten, dass mit dem erarbeiteten Simulationsparameter kein Nachweis geführt wird. Es wird ein Simulationsumgebung geschaffen, welche dazu dient, Papierkonstruktionen mit konventionellen Konstruktionen zu vergleichen und die Qualität von unterschiedlichen Wandkonstruktionen betreffend dem sommerlichen Wärmeschutz zu vergleichen. Die Ausgangsvariante werden aber dennoch als zu weit entwerft von der Realität eingestuft. Folglich werden in der Sensitivitätsanalyse folgende Parameter überprüft.

Es werden drei Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

- A01 Sensibilitätsanalyse Lüftung
- A02 Sensibilitätsanalyse Externe Lasten
 - o Fenstergröße
 - o Sonnenschutz
- A03 Sensitivitätsanalyse Interne Lasten

A01 Sensitivitätsanalyse Lüftung

Mutmaßlich verhindert der geringe Luftwechsel (dauerhaft 0,5 1/h, hygienischen Mindestluftwechsel) das Auskühlen über Nacht. Dies führt vor allem im Sommer zu extremen Innenraumtemperaturen. Folglich wird überprüft, inwiefern ein anderes Lüftungsverhalten dem entgegenwirken kann. Es wurden zwei Szenarien simuliert:

- Ideale natürliche Nachtluftspülung
- Ideale natürliche Tag- und Nachtluftspülung

Bei beiden Szenarien wird ein ideales Nutzerverhalten mit folgenden Parametern zugrunde gelegt:

Ideales Nutzerverhalten Nachtluftspülung

Art des Luftwechsels	Luftwechselrate [1/h]	Bedienungen
Infiltration	0,1	Keine (immer)
Natürliche Lüftung	0,5	Keine (immer)
Nachtluftspülung	1,5	Operative Innenlufttemp. >24°C, Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen mind. 4K, nur zwischen 21.00 und 06.00 Uhr

Tab. A 5: Sensitivitätsanalyse A01, Ideales Nutzerverhalten Nachtluftspülung

Ideales Nutzerverhalten Tag- und Nachtluftspülung

Art des Luftwechsels	Luftwechselrate [1/h]	Bedienungen
Infiltration	0,1	keine
Natürliche Lüftung	0,5	keine
Tag und Nachtluftspülung	1,5	Operative Innenlufttemp. >24°C, Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen mind. 4K

Tab. A 6: Sensitivitätsanalyse A01, Ideales Nutzerverhalten Tag- und Nachtluftspülung

Aus der erweiterten Betrachtung der Simulationen werden folgende Ergebnisse abgeleitet:

Ausgangsvariante	Max. operative Innenraumtemperatur 42,4°C (max. Außenraumtemp: 31,4 °C) Es fallen 3523h >26°C an, was 40,2% der Jahresstunden entspricht. Dabei werden 21198 Übertemperaturstunden erreicht.
Ideale natürliche Nachtlüftung:	Die max. op. Innenraumtemperatur ist gegenüber der Ausgangsvariante um 6,4K gesunken (36,0°C). Die Stunden > 26°C haben sich um 1357h auf 2166h reduziert, was 27,7% der Jahresstunden entspricht. Dabei werden 15377 Übertemperaturstunden erreicht und 5821 weniger als in der Ausgangsvariante
Ideale natürliche Tag- und Nachtlüftung:	Die max. op. Innenraumtemperatur ist gegenüber der Ausgangsvariante um 8,2K gesunken (34,2°C). Die Stunden >26°C haben sich um 2466h auf 1057h reduziert, was 12,1% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 18982 Übertemperaturstunden weniger (2215)

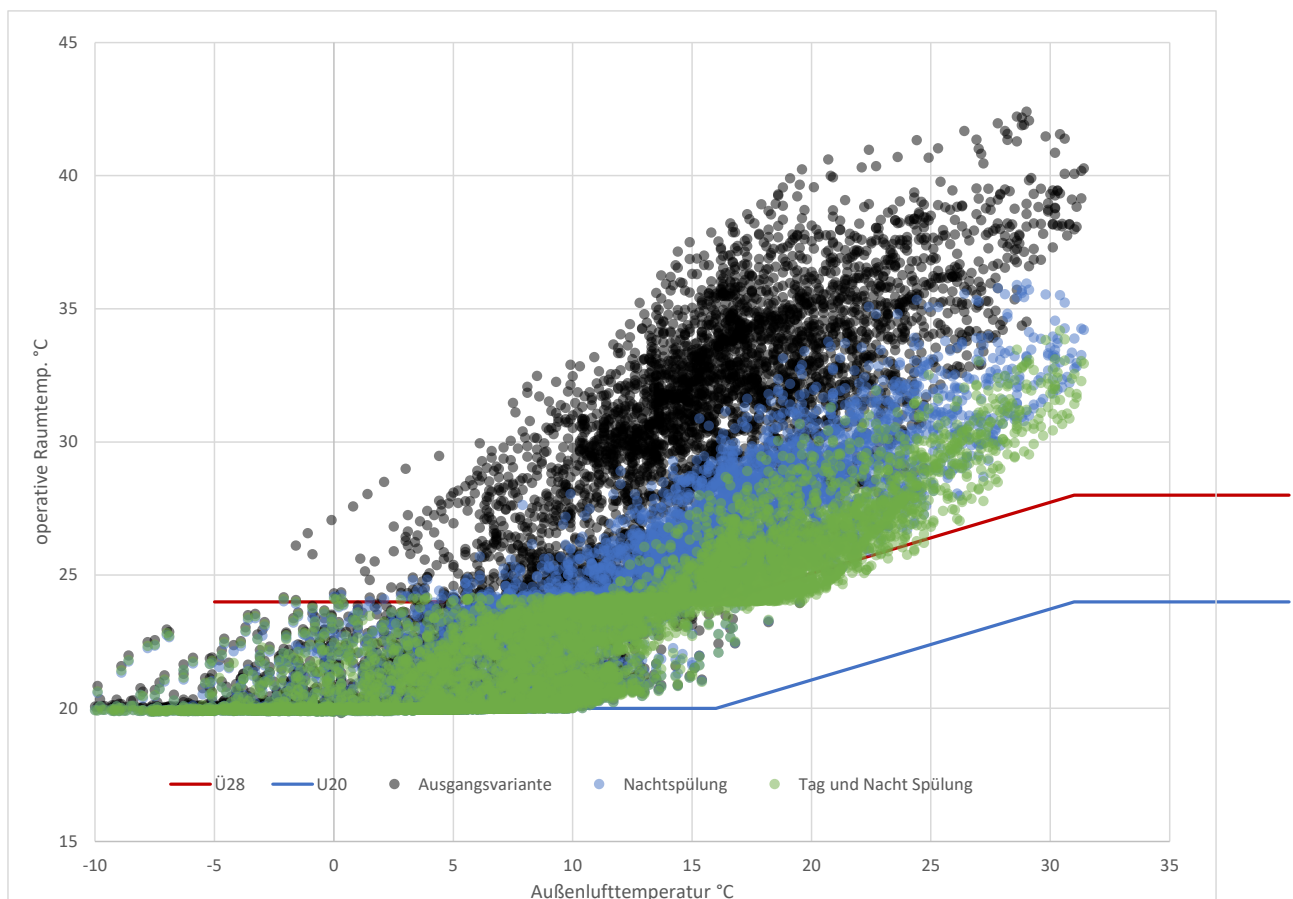


Abb. A 6: Sensitivitätsanalyse A01, Lüftung

Fazit:

Die natürliche Tag und Nachtlüftungspülung als ideales Nutzerverhalten angenommen, führt zu deutlich weniger Stunden >26 °C und die max. operative Innenraumtemperatur sinkt deutlich Zu 12,1% der Jahresstunden liegen die operativen Temperaturen bei > 26 °C.

A02 Sensitivitätsanalyse Fenstergröße und Verschattung

Zu einem hohen Wärmeeintrag tragen zudem solare Lasten bei die neben der Fenstergüte maßgeblich durch die Fenstergröße bestimmt sind. Es wird überprüft, wie groß der Einfluss des festgelegten Parameters „Fenstergröße“ ist. Dafür wird die Fenstergröße von 150cm x 170cm (2,55m²) auf 120cm x 150cm (1,8m²) reduziert.

Die Fenstergröße hat die folgenden Einflüsse auf das thermische Raumverhalten:

Kleineres Fenster	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem Ausgangsparameter um 3,6K gesunken (38,8°C). Die Stunden >26°C wurden um 386h auf 3137h reduziert. Dies entspricht 35,8% der Stunden in einem Jahr. Dabei werden 6209 Übertemperaturgradstunden weniger als bei der Basisvariante erreicht (14989).
-------------------	---

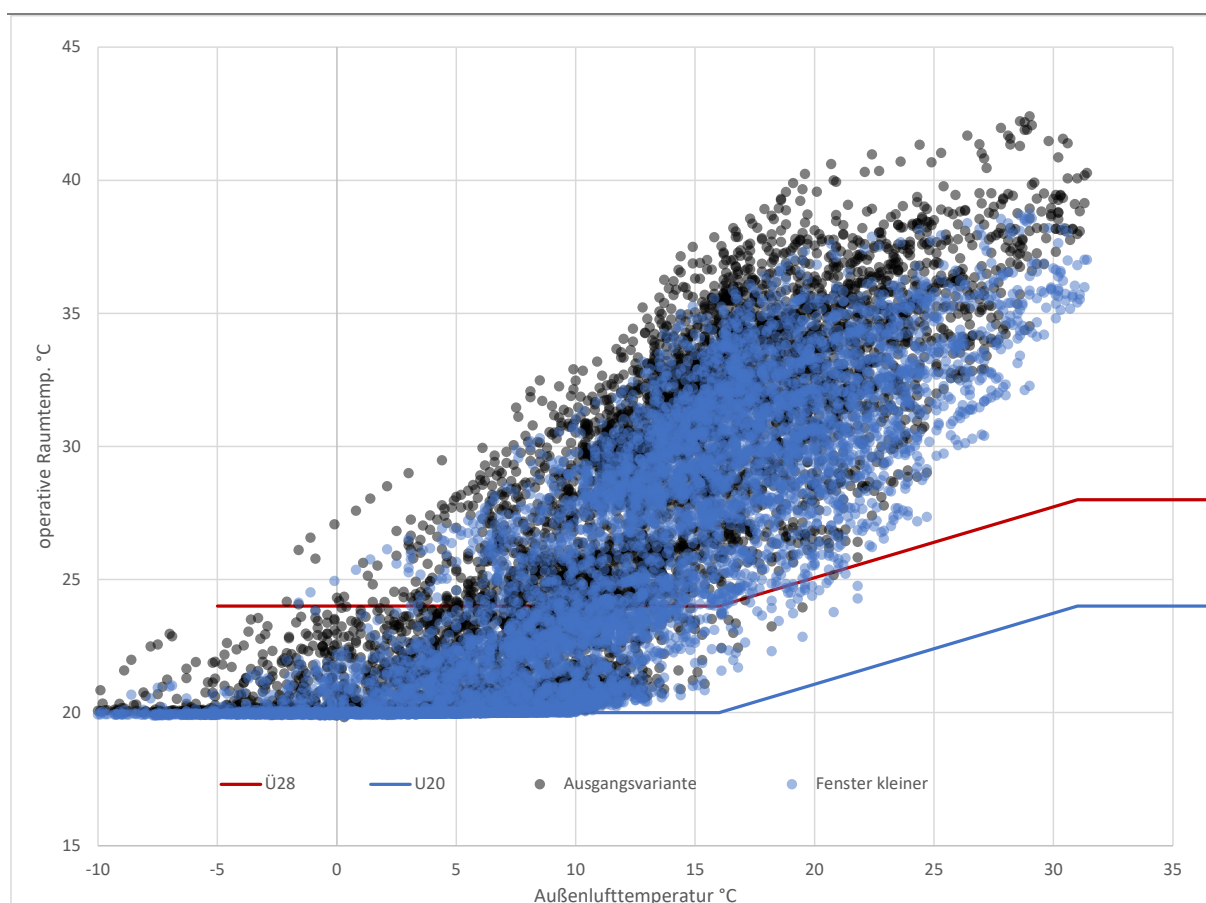


Abb. A 7: Sensitivitätsanalyse A02a, Fensterabmessung

Fazit:

Ein kleineres Fenster minimiert die externen Lasten und verbessert den sommerlichen Wärmeschutz. Jedoch nur in einem geringen Maße. Für die weitere Betrachtung wird das Anpassen der Fenstergröße nicht in betracht gezogen.

Ein weiterer Aspekt den sommerlichen Komfort maßgeblich bestimmt ist der Sonnenschutz. Bei der Ausgangsvariante wurde kein Sonnenschutz angesetzt. In einem weiteren Schritt wird getestet, was ein innenliegender Sonnenschutz ($F_c=0,8$) und ein außenliegender Sonnenschutz ($F_c=0,3$) für einen Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz haben.

Innenliegender Sonnenschutz	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem Ausgangsparameter um 2,5K gesunken ($39,9^\circ\text{C}$). Die Stunden $>26^\circ\text{C}$ haben sich um 270h auf 3253h reduziert, was 37,1% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 4940 Übertemperaturstunden weniger (16257).
Außenliegender Sonnenschutz	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem Ausgangsparameter um 8,8K gesunken ($33,6^\circ\text{C}$). Die Stunden $>26^\circ\text{C}$ haben sich um 1269h auf 2227h reduziert, was 25,4% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 15140 Übertemperaturstunden weniger (6057).

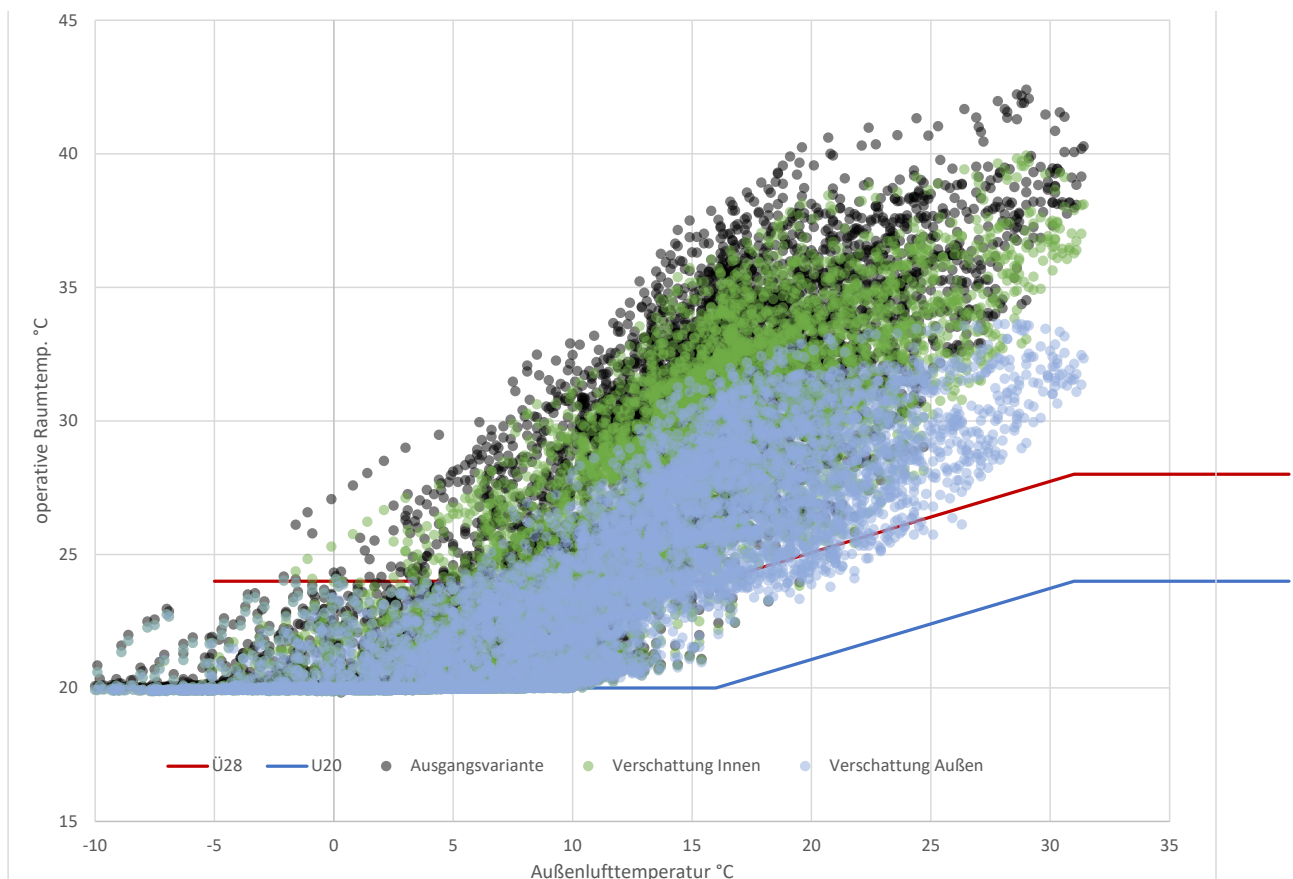


Abb. A 8: Sensitivitätsanalyse A02b, Verschattung

Fazit:

Ein innenliegender Sonnenschutz mindert die externen Lasten nur gering, wohingegen ein außenliegender Sonnenschutz die max. op. Innenraumtemperatur, sowie die Stunden $>26^\circ\text{C}$ und die Übertemperaturstunden merklich senkt. Für die weitere Betrachtung wird ein Außenliegender Sonnenschutz ($F_c=0,3$) festgelegt.

Nach der Betrachtung einzelner Einflussgrößen wird die Ausgangsvariante wie folgt angepasst:

Art des Luftwechsels	Luftwechselrate [1/h]	Bedingungen
Infiltration	0,1	keine
Natürliche Lüftung	0,5	keine
Tag und Nachtlüftungspülung	1,5	Operative Innenlufttemp. >24°C, Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen mind. 4K

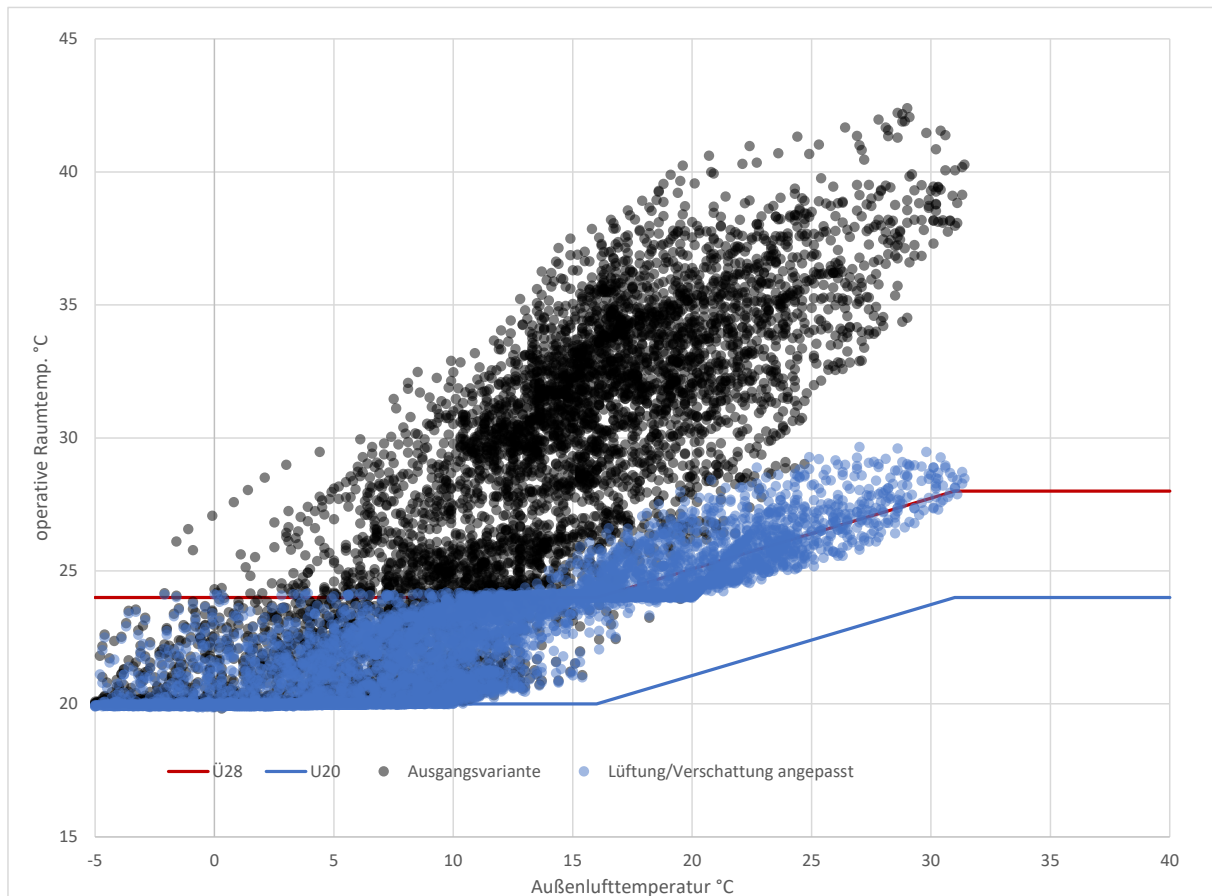


Abb. A 9: Sensitivitätsanalyse, Lüftung und Verschattung angepasst

Auswertung:

Lüftung und Verschattung angepasst	Die max. op. Innenraumtemperatur von 29,7 °C ist gegenüber dem Ausgangsparameter um mehr als 10 K gesunken. Die Stunden >26°C haben sich um 2989h auf 534h reduziert, was 6,1% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 20595 Übertemperaturstunden weniger (602).
------------------------------------	---

A03 Sensitivitätsanalyse interne Lasten

Für die Sensitivitätsanalyse A03 werden die angepassten Parameter aus A01 und A02 verwendet. Um einen „nutzungsneutralen Standartraum“ abzubilden wurden bei den Ausgangsparametern eine dauerhaft anfallende und gleichbleibende interne Last von Konv = 70 W Strahlung = 30W und Feuchte 50g/h definiert. Um zu überprüfen, wie sich diese interne Last im Vergleich zu verschiedenen Wohnszenarien verhält, wurden die folgenden drei weitere Szenarien simuliert.

- Single Haushalt, Wohnzimmer, Tagesprofil für einen Werktag (nicht Wochenende)
- Single Haushalt, Schlafzimmer, Tagesprofil für einen Werktag (nicht Wochenende)
- Fiktiv: 0,3 Personen (Wärme Konv.:23,3W / Wärme strahl. 10W / Feuchte 16,6g/h)

Die 0,3 Personen repräsentieren die Anzahl an Personen, welche sich in dem „Standarraum“ aufhalten würden, bezogen auf die durchschnittliche Quadratmeterzahl pro Kopf in Deutschland. Der Standartraum ist 16 m² groß. Der durchschnittliche Flächenverbrauch pro Kopf im Jahr 2021 lag in Deutschland bei 47,7 m² [Umw22b].

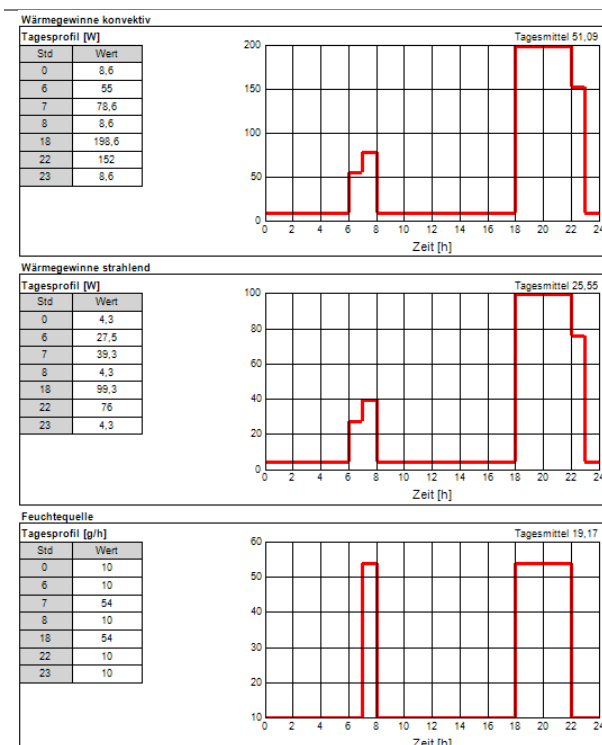


Abb. A 10: Profil interne Lasten, Wohnzimmer, Werktag

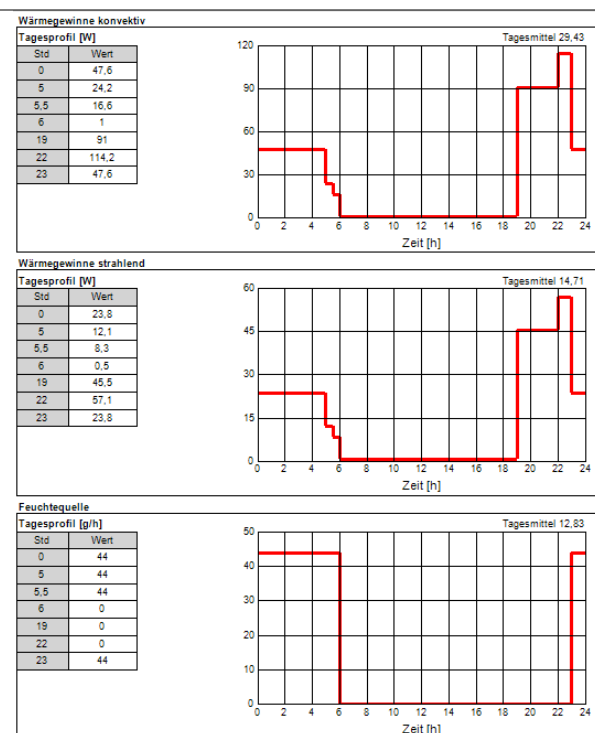


Abb. A 11: Profil interne Lasten, Schlafzimmer, Werktag

Auswertung:

Single Haushalt, Wohnzimmer	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem Ausgangsparameter um 0,1 K gesunken (29,8 °C). Die Stunden > 26 °C haben sich um 207 h auf 327 h reduziert, was 3,7 % der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 268 Übertemperaturgradstunden weniger (335)
-----------------------------	---

Single Haushalt, Schlafzimmer	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem Ausgangsparameter um 1,8K gesunken (27,9°C). Die Stunden >26°C haben sich um 413h auf 121h reduziert, was 1,4% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 533 Übertemperaturgradstunden weniger (69)
1/3 Person	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem Ausgangsparameter um 2K gesunken (27,6°C). Die Stunden >26°C haben sich um 391h auf 143h reduziert, was 1,6% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 510 Übertemperaturgradstunden weniger (92)

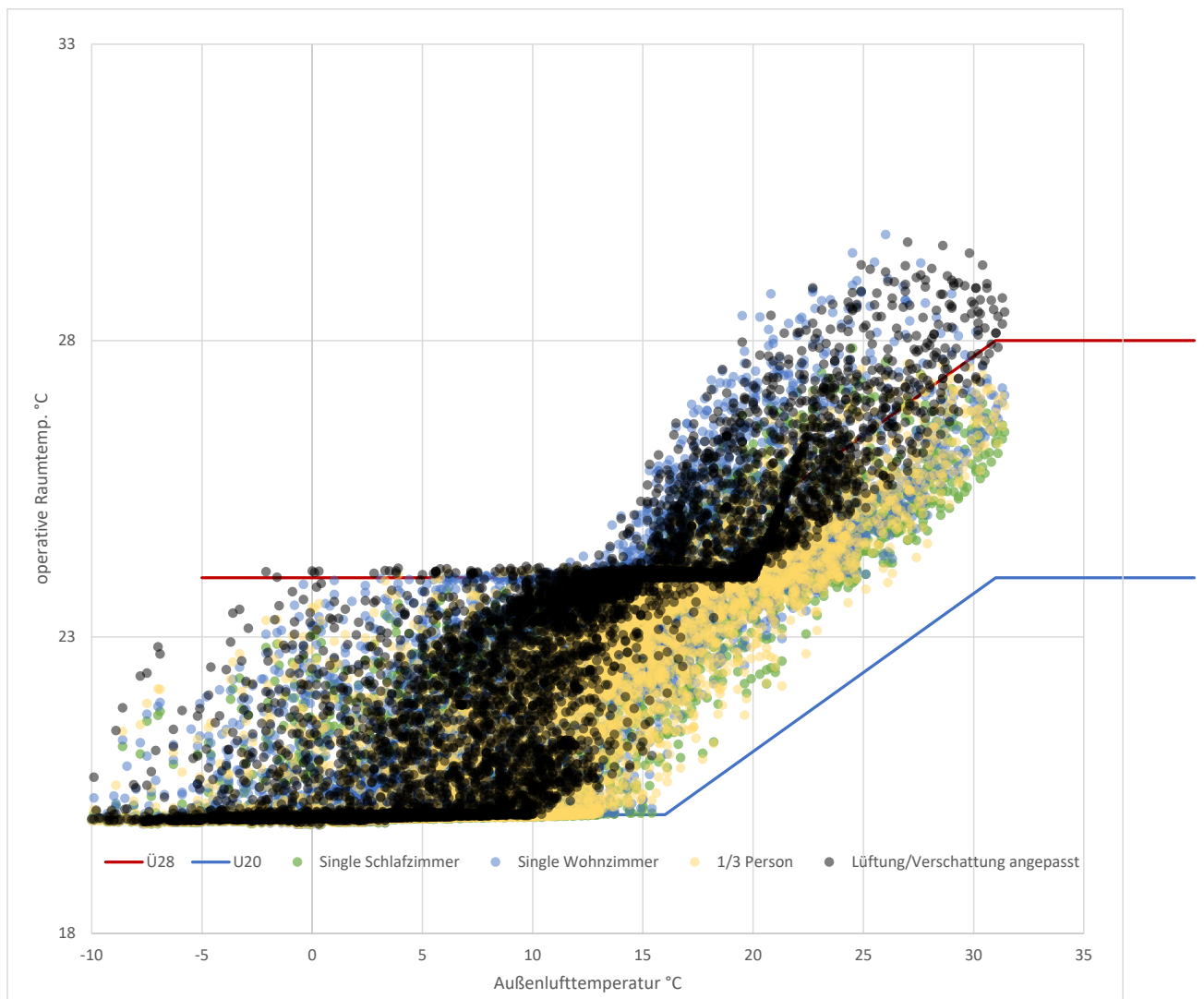


Abb. A 12: Sensitivitätsanalyse A03, interne Lasten

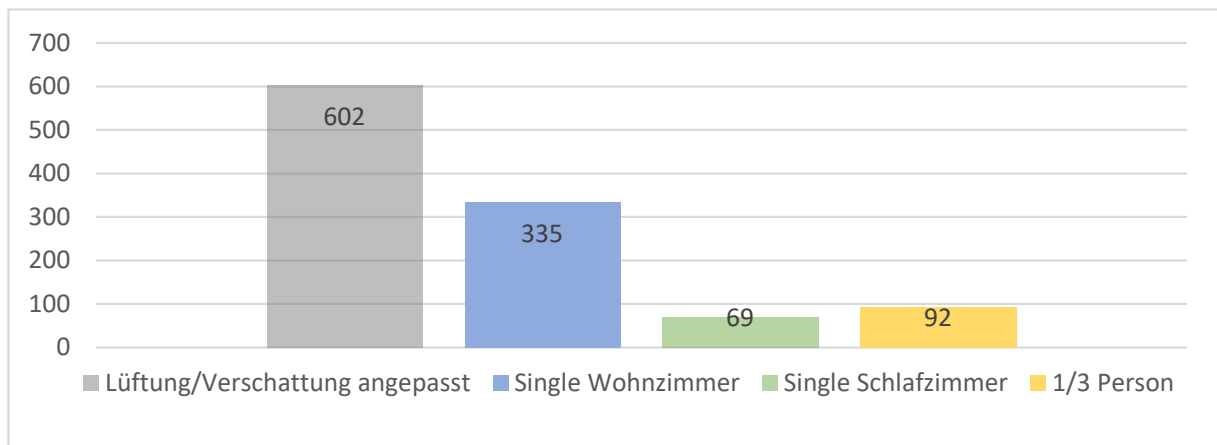


Abb. A 13: A03, Interne Lasten, Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Bei allen drei Varianten fallen deutlich weniger Übertemperaturgradstunden gegenüber der Ausgangsvariante an. Dadurch kann gesagt werden, dass im weiteren Verlauf der Betrachtungen der Konstruktionen ein erhöhtes Augenmerk auf die interne Lasten durch beispielsweise Personen gelegt werden muss.

3.2.3.3 Basisparameter

Aus den Erkenntnissen der vorherigen Abschnitte werden in diesem Abschnitt die Basisparameter abgeleitet mit denen die unterschiedlichen Papierkonstruktionen untersucht werden. Die Lage und Ausrichtung (1) werden dabei nicht weiter untersucht oder angepasst (vgl. 3.2.3.1 Position). Die Geometrie und Konstruktion (2) werden ebenfalls nicht weiter untersucht oder angepasst (vgl. Abschnitt 3.2.3.1). Das Lüftungskonzept (3) wird aufgrund der Sensitivitätsanalyse A01 so angepasst, dass eine natürliche Lüftung unter den Bedingungen eines idealen Nutzerverhaltens simuliert wird. Es werden neue folgende Basisparameter definiert:

Art des Luftwechsels	Luftwechselrate [1/h]	Bedingungen
Infiltration	0,1	Keine (immer)
Natürliche Lüftung	0,5	Keine (immer)
Tag und Nachtlüftungspülung	1,5	Operative Innenlufttemp. >24°C, Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen mind. 4K

Tab. A 7: Basisparameter Lüftung

Die Luftwechselrate für die Nachtlüftungspülung wurde mit 1,5 1/h abgebildet, da so in Kombination mit der natürlichen Lüftung von 0,5 1/h eine Luftwechselrate von 2 1/h erzielt wird was den gesetzlichen Mindestanforderungen der Nachtlüftungspülung für den sommerlichen Wärmeschutz entspricht.

Externe Lasten (4): Aufgrund der Sensitivitätsanalyse A02 wird ein außenliegender Sonnenschutz vorgesehen. Die Fenstergröße wird nicht angepasst. Es werden neu folgende Basisparameter definiert:

Abmessung	150 x 170 cm	
Fensterfläche	2,55 m ²	
U_w-Wert	1,31 W/m ² K	Dreifachverglasung
g-Wert	0,51	
F_c	0,3	<i>Außenliegender Sonnenschutz</i>

Abb. A 14: Basisparameter Fenster

Die internen Lasten (5) bleiben aufgrund der Sensitivitätsanalyse A03 unverändert.

Wärme konvektiv	70 W
Wärme strahlend	30 W
Feuchte	50 g/h
Dauer	24h/ 365d

Tab. A 8: Basisparameter interne Lasten

Mit diesen Basisparametern als Randbedingungen wird in Abschnitt 4.2 in die vertiefende Untersuchung der Papierkonstruktionen übergegangen, nachdem im folgenden Abschnitt die Anforderungen an die Kreislauffähigkeit festgelegt werden.

3.3 Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Papierkonstruktionen (RB)

3.3.1 Ökologischer Eigenschaften von Papierprodukten im Gebäude

Die Umweltwirkung von Gebäuden wird durch verschiedene Parameter geprägt, die sich in die Kategorien Gebäudebetrieb, Bausubstanz und Mobilität gliedern lassen. Dabei wird letzteres durch die Anbindung am Standort geprägt und hier nicht betrachtet. Um zu einer geringen Energiemenge während des Betriebs beizutragen, müssen Fassaden Mindestanforderungen an den Wärmeschutz erfüllen.

Im vorliegenden Projekt steht die Bausubstanz im Fokus. Dabei wird in der ökologischen Betrachtung von Produkt ausgegangen.

In 5.1. wird die Papier- und Bindemittelherstellung in den Fokus genommen und der Lebenszyklus mit Umweltwirkung vorgestellt. Anschließend folgt die Betrachtung im Bauteil. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die ökologischen Eigenschaften der Papierkonstruktionen untersucht und bewertet werden.

Dabei werden die Herstellung mit Hilfe der Ökobilanz bewertet. Für die Nutzung wird die Dauerhaftigkeit und Instandsetzungsmöglichkeiten beschrieben. Die Nachnutzung wird anhand hinsichtlich der Eignung zur Wiederverwendung auf Bauteil oder Produktebene oder zur Wiederverwertung auf stofflicher Ebene vorgestellt.

3.3.2 Fragestellung und Methodik

Die vorliegenden Untersuchungen für die Kreislauffähigkeit von Papierkonstruktionen befasst sich daher zum einen mit dem ökologischen Aufwand zur Herstellung der Bauteile und zum anderen mit der Dekonstruktion und der sich daraus ergebenden Eignung zur weiteren stofflichen Nutzung. Daraus ergeben sich verschiedene Fragestellungen, die im Projektrahmen beantwortet werden.

Fragestellungen zu Papierwerkstoffen:

- P1) Wie hoch ist der Umwelteinfluss von Papierprodukten in Relation zu konventionellen Bauprodukten?
- P2) Welche Wechselwirkungen ergeben sich aus dem Produktionsprozess von Papier hinsichtlich der Umweltwirkung?
- P3) Anforderungen an den Recyclingprozess: Wie sortenrein (Vermischung mit Klebstoffen) müssen Papierreste sein, um weiter verarbeitet zu werden?

Fragestellungen zu Bindemitteln:

- B1) Welche Klebstoffe eignen sich für die Verklebung von Papierschichten?
- B2) Welche Menge vom Klebstoff und Auftragungsmuster ergeben das beste Verhältnis zwischen ausreichender Haftkraft und einfachem Ablösen?

Fragestellungen zum Mock-Up

- M1) Wie hoch ist die Umweltwirkung für die Herstellung im Vergleich zu konventionellen Aufbauten?

M2) Kann die Lösbarkeit der Komponenten und die Trennung der Schichten umgesetzt werden?

Die Beantwortung von P1, P2, P3 und B1 erfolgt auf Basis einer Literaturrecherche sowie durch die Ermittlung von Ökobilanzwerten. Dabei wurden Studienergebnisse, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Informationen von Herstellern sowie Standards ausgewertet. Um die Umweltwirkungen der Herstellung zu ermitteln, werden die Massen der Bauprodukte erfasst und Ökobilanzwerten aus Datenbanken zugeordnet. Daten für Papierwerkstoffe sind in den frei zugänglichen Quellen für Ökobilanzwerte von Bauprodukten nicht enthalten und wurden aus Einzelquellen ermittelt.

Die niedrige Festigkeit von Papierwerkstoffen und die geringere Materialstärke wird durch die Erhöhung von Schichten kompensiert. Da diese nicht form- und kraftschlüssig gefügt werden, kommen Bindemittel zum Einsatz und stellen bauphysikalisch eine stoffschlüssige Verbindung her. Für eine kreislaufgerechte Konstruktion soll das Bindemittel in der Nutzungsphase fest und anschließend lösbar sein, ohne dass Rückstände eine Verklebung die weitere Verarbeitung kompromittieren. Darüber hinaus spielt die Verarbeitbarkeit eine Rolle bezogen auf die Trocknungszeit, um Stapeln der Schichten zu arrangieren sowie die Notwendigkeit zur Einbindung von Maschinen. Für B2 wurden Versuche ausgeführt. Dafür wurden Klebetests zwischen unterschiedlichen Papierwerkstoffen (Papprohre, Well- und Vollpappe) durchgeführt. In der Recherche von B1 zeigte sich die Eignung bestimmter Klebstoffe, deren Untersuchung dann unter B2 erfolgte. In den Experimenten wurden Weißleim und Dextrinkleber hinsichtlich folgender Aspekte beforst:

- Haftkraft [N]
- Auftragungsmuster
- Menge vom Klebstoff [g/m²]
- Art der Oberflächen
- Bildung von Stickies*
- Integrität der dekonstruierten Bauteile [qualitative Einschätzung]

Anschließend wurde überprüft inwieweit sich Materialien in Wasser herauslösen. Dafür wird der sogenannte Sticky-Test genutzt. Mit Stickies werden klebende Partikel bezeichnet, die sich aus dem Rohstoff Altpapier aus Primär- und Sekundärfaserstoffen herauslösen.

Für M1 für eine qualitative Einschätzung vorgenommen. Basierend darauf wurden Mock-Ups umgesetzt. Bei den Mock-Ups wurden verschiedene Konstruktionsvarianten, Materialkombinationen, Fügeprinzipien und Verbindungsmethoden eingesetzt. Insgesamt wurden fünf Prototypen in Holzrahmenbauweise und variierende Dämm-, Ober- und Innenschichten untersucht. Während der Bauarbeitsprozessen wurden die folgenden Aspekte evaluiert:

- Verarbeitbarkeit [qualitative Einschätzung]
- De- und Montageaufwand [h]

- Energieverbrauch [kWh]
- Weiternutzbarkeit [qualitative Einschätzung]

Nach Evaluation der oberen Punkte und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Ökobilanz und Klebstofftests kann einen funktionsfähigen und sinnvollen Vorschlag für Wandaufbau und Materialauswahl beim Folgeprojekt für einen Wohngebäude aus Papier gemacht werden.

4 Vorkonzeption Wandaufbau

4.1 Gestaltung, Konstruktion, Statik, Fassade (ISMD)

4.1.1 Maße und Dimensionen

Aufgrund der begrenzten Marktverfügbarkeit von Profilrohren mit ausreichenden Dimensionen, war eine Herstellung der Konstruktionstypen 3A und 3B (vgl. Kap. 3.1.) nicht möglich. Da nach Gesprächen mit unterschiedlichen Papierherstellenden perspektivisch nicht mit einer solchen Verfügbarkeit zu rechnen ist, was eine Umsetzung der palisadenartigen Konstruktion ausschließt, wurde sich beim Prototypenbau auf eine Umsetzung der Typen 2A, 2B, 4A und 4B konzentriert.

Hinsichtlich der Größe der Prototypen wurde der zunächst 2x2m große Konstruktionsschnitt auf ein Maß von 1x1,5m reduziert, in dem jedoch nach wie vor alle relevanten Knotenpunkte und auch der Anschluss Wand/Dach abgebildet werden konnten (vgl. Anh4_Prototypen ISMD).

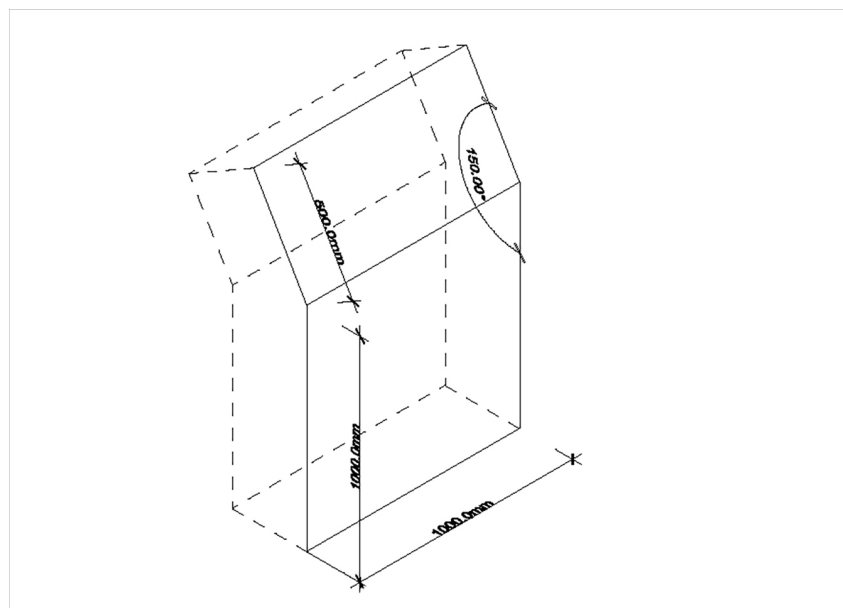


ABB. B 92: Maße der Prototypen

Die Schichtaufbauten der zur Herstellung vorgesehenen Typen wurden anschließend erneut mit Blick auf die Statischen und Baukonstruktiven Anforderungen in geringem Umfang modifiziert.

4.1.2 Mock-Ups der Konstruktionstypen

Typ 2A wurde als mit einem Ständerwerk aus Papprohren erstellt, welche durch eine Steckverbindung zusammengefügt wurden. Da Papprohren in der Regel als tragender Kern für gewickelte Güter oder als Verpackung für Stangenware zum Einsatz kommen, ist die Auswahl an marktverfügbaren Profilen begrenzt. Querschnitte, welche für Bauanwendungen üblich sind, sind leider nicht erhältlich und konnten

lediglich unter hohen Kosten als Sonderanfertigung bezogen werden. Aufgrund der begrenzten Mittel wurde ein Querschnitt von 103,6x203,6mm verwendet.

Die Verbindungsweise wurde aus einer vorangegangenen Dissertation [Kan21] abgeleitet. Anstatt einer Innenlage aus einer Karton-Verbundplatte wurde eine Holzwerkstoffplatte verwendet. Da die verwendeten Profilrohre mit ihrer Wandstärke keine ausreichende Befestigungsfläche für Schrauben bieten konnten wurden an ihren Innenseiten Dachlatten eingeklebt, in denen die Verbindungsmittel halt finden sollten. Auf die Füllung der Profile mit Zellulose wurde verzichtet, da die lose Schüttung keinerlei Auswirkungen auf die Stabilität des Prototyps gehabt hätte. Die außenseitige Beplankung mit der Karton-Verbundplatte ließ sich zwar aufschrauben, jedoch war das Beplankungsmaterial wenig widerstandsfähig gegen den von den Schraubenköpfen ausgeübten Druck und wurde an den Verbindungsstellen mehrfach stark verformt. Vorbereitung und Montage des Prototyps gingen einfach von Statten, da die kleinteiligen Einzelkomponenten handlich und leicht genug für eine händische Montage durch eine einzelne Person waren. Die Stabilität des Prototyps war zufriedenstellend, jedoch war der Beitrag, den die Karton-Verbundplatte zur Queraussteifung lieferte geringer als zunächst vermutet. Durch ihre Mittellage aus Wellpappe verformte sie sich, sobald eine Schubbelastung auftrat.

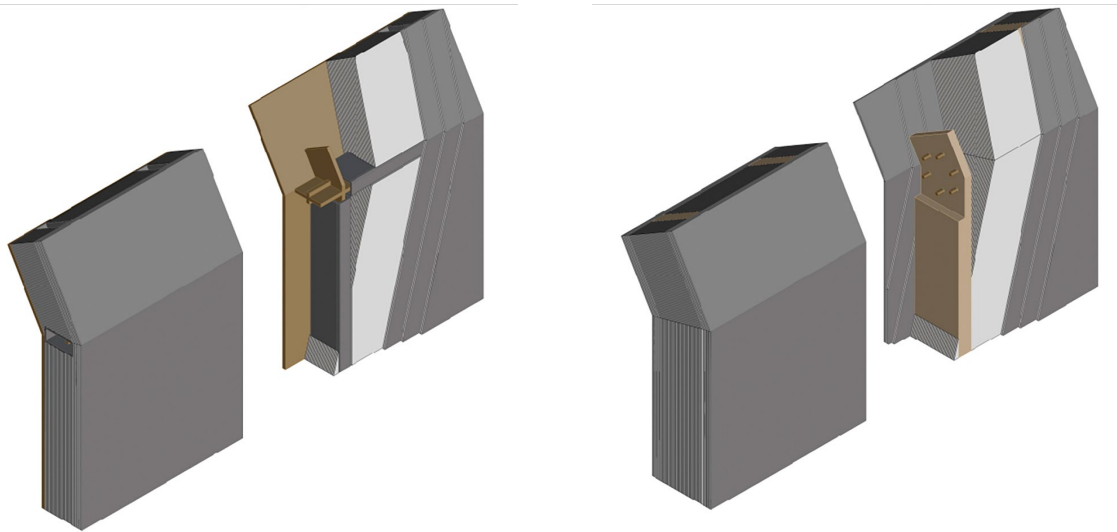


ABB. B 103: Konstruktionstypen 2A (links) und 2B(rechts)

Typ 2B wurde mit einem Ständerwerk aus Holz erstellt, welches dahingehend verändert wurde, dass keine Querriegel verbaut wurden. An ihm sollte getestet werden wie eine Verblattung der Ständer an ihren Stoßstellen umzusetzen wäre. Hierzu wurden jeweils 50% des Querschnittes ausgeklinkt und eine Biegesteife Verbindung beider Ständer über radial angeordnete Bolzen hergestellt. Der Prototyp wurde beidseitig mit Karton-Verbundplatten beplankt, welche sich beim Befestigen in den Ständern mittels Schrauben als gleichermaßen problematisch wie schon bei Typ 2A erwiesen. Die händische Montage stellte sich erneut als leicht durchführbar heraus, da auch hier die Einzelkomponenten leicht und handlich genug für die händische Montage durch eine einzelne Person war. Da der Prototyp über keinerlei Querriegel verfügte, erwies er sich leider als wenig Steif gegen Querbelastung. Auch die verwendete Karton-Verbundplatte trug wie zuvor nur wenig zur Queraussteifung der Konstruktion bei.

Typ 4A wurde dahingehend angepasst, dass der Elementstoß der Rahmenhölzer nicht exakt mit der Knickfuge zwischen Wand und Dach korreliert. Ziel hierbei war die Überprüfung, ob sich ein Elementstoß unter 90° vereinfachend auf die Herstellung auswirkt, da weniger Balkenkanten zugerichtet werden müssten. Die vier Einzelsegmente waren jeweils beidseitig mit einer Holzwerkstoffplatte beplankt. Ihre Verbindung untereinander wurde durch schwalbenschwanzförmige Ausschnitte realisiert, in welche wiederum geometrisch passende Holzkeile eingeschlagen wurden. Jedoch erwies sich das Verschieben der Stoßkante nicht als deutliche Vereinfachung, da nun an anderer Stelle das Dämmmaterial winklig angearbeitet werden musste. Ebenfalls wurde hierdurch die aussteifende Wirkung der Beplankung geschwächt, da diese nicht bei allen Elementen eine Überdeckung mit dem Randverbund hat. Die Montage stellte eine Herausforderung dar, da die vier Einzelsegmente durch ihren hohen Holzanteil schwer und unhandlich wurden. Das einschlagen der Schwalbenschwänze stellte eine stabile Verbindung her, welche sich jedoch nur unter größerem Aufwand wieder demontieren lässt. Trotz allem stellt Typ 4A den stabilsten der vier hergestellten Prototypen dar, was vor allem seinem hohen Holzanteil geschuldet sein dürfte.

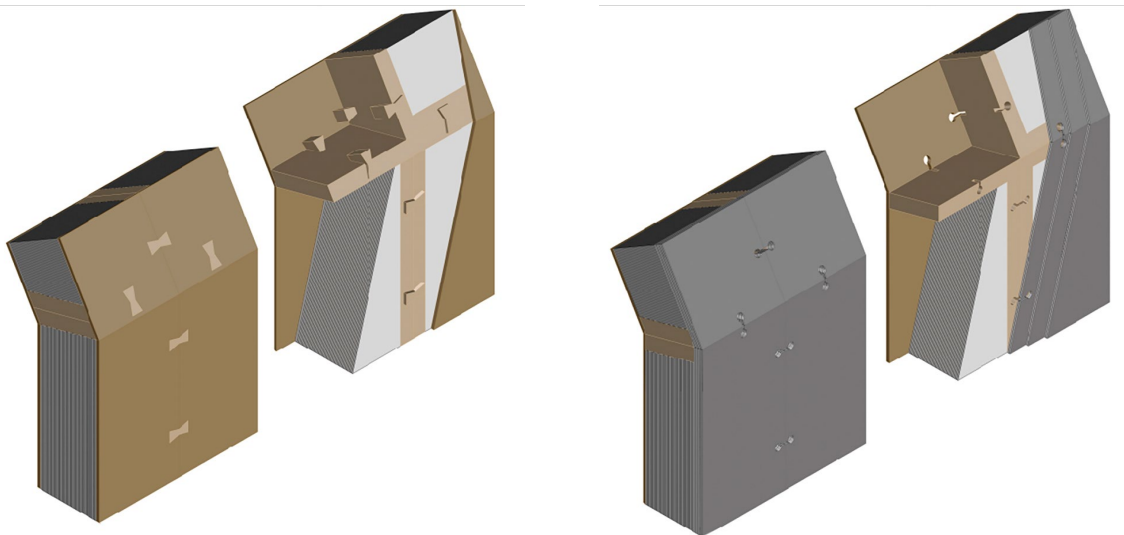


ABB. B 114: Konstruktionstypen 4A (links) und 4B(rechts)

Typ 4B weicht als einziger Prototyp nicht von der Vorlage aus Kapitel 3.1. ab. Die vier Segmente wurden mit Hilfe von Möbelverbindern zusammengefügt, einer Technik, die sich schon in einem Vorgängerprojekt bewährt hatte [WBK21]. Erneut stellte das Fügen der den hohen Holzanteil schweren und unhandlichen Teilstücke eine Herausforderung dar und auch das Anbringen der Karton-Verbundplatte mittels Schrauben führte zu den bereits bekannten Problemen. Wie auch der mit ihm verwandte Typ 4A stellte sich 4B durch seinen hohen Holzanteil als eine stabile Konstruktion heraus. Die Möbelverbinder ermöglichten zudem eine einfache Demontage der Elemente.



ABB. B 125: Übersicht aller gebauten Prototypen (ISMD Nr. 1-4 von links)

Zusammenfassend konnte keiner der erstellten vier Prototypen uneingeschränkt zur Weitererforschung empfohlen werden. Obwohl sich die Typen 4A und 4B durch eine gute Stabilität auszeichneten, standen dem ein schwierige Montage und ein hoher Holzanteil entgegen. Die noch ausbaufähige Stabilität der Typen 2A und 2B wurde im Wesentlichen auf die verbesserungswürdige Karton-Verbundplatte zurückgeführt.

Aus konstruktiver Sicht erfolgte nach Abschluss der Prototypenphase eine deutliche Empfehlung zur Weitererforschung der Rahmenbauweise als Iterationen des Typs 2. Besonders im Fokus sollte hierbei die Optimierung der Beplankung stehen, wodurch die Queraussteifung verbessert werden sollte. Entgegen erster Annahmen, dass eine Karton-Verbundplatte mit einer Kernlage aus Wellpappe im Hinblick auf die Dämmwirkung Vorteile mit sich brächte, gingen mit diesem Aufbau auch bedeutende Nachteile bezüglich ihrer Stabilität einher. Im weiteren Projektverlauf wurde eine aus mehreren Kartonschichten mit hoher Grammatur bestehende Verbundplatte untersucht. Auch die Verwendung von Pappröhren als Ständerwerk wurde hinsichtlich ihrer Verarbeitung, aber auch aufgrund der Nichtverfügbarkeit geeigneter Profile nicht tiefergehend untersucht.

4.2 Bauphysik und Bauklimatik (IBEA)

Die Papierkonstruktionen wurden, unter Berücksichtigung der Anforderungen der anderen Projektbeteiligten entwickelt. Dabei wird aus bauklimatischer Sicht die Konstruktion bauphysikalisch bewertet und parallel dazu die Näherungswerte der bauphysikalischen Eigenschaften von Papierbaustoffen abgeleitet (vgl. Abschnitt 5.2.1).

4.2.1 Betrachtung 1 – Konstruktionsvarianten

Zu Beginn des Projektes sind vier mögliche Konstruktionen die aus konstruktiven Anforderungen abgeleitet worden sind, vorgeschlagen worden (siehe Abschnitt 3.1). Zwei Typen sind nach eingängiger konstruktiver Prüfung wieder verworfen worden. Für die bauklimatische Untersuchung werden die Konstruktionsarten Ständerbauweise (Typ 2A und B) und Elementbauweise (Typ 4 A und B) im Folgenden näher betrachtet. Die Bauteilstärke richtet sich dabei nach dem zu erreichenden Zielwert für opake Außenwände nach dem GEG 2020. Dabei wird zudem der vorgegebene U-Wert für Außenwände ($0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) auf $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ reduziert um die laut §15 geforderten Einsparungen von 75% des Primärenergiebedarfs inkl. 5% Sicherheitszuschlag zu erfüllen (vgl. GEG, 2020). Dabei kommen zwei unterschiedliche Papierwerkstoffe zum Einsatz: 7mm Wellpappe und 2mm Vollpappe. Wellpappe wird aufgrund der schlechteren Wärmeleitfähigkeit als Dämmstoff im Kern der Ständer- wie auch der Rahmenkonstruktion eingesetzt. Für die Beplankung werden in einem ersten Schritt zusammengesetzte Deckschichten aus Vollpappe, zwei Lagen Wellpappe und einer Deckschicht Vollpappe verwendet. Alle Schichten sind vollflächig mit Weißleim (Ponal, Classic) verklebt. In der Folge wird diese Platte als Kartonverbundplatte (kurz KVP_00) bezeichnet.

Um den U-Wert des Wandaufbaus zu ermitteln, wurden für Wellpappe eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,51 \text{ W}/(\text{m K})$ und für Vollpappe $\lambda=0,72 \text{ W}/(\text{m K})$ angesetzt [BKH20].

Mit dem Ziel einen Wandaufbau zu definieren, welcher konzeptionell die größte Überschneidung der drei Betrachtungsfelder (Statik/ Konstruktion, Bauphysik/ Bauklimatik und Rezyklierfähigkeit/ Graue Energie) aufweist, werden vier Wandaufbauten auf ihre bauklimatischen Eigenschaften hin untersucht und qualitativ eingeordnet. Folgende vier Typen dienen als Ausgangslage für die bauklimatische Betrachtung:

	Ständerbau Typ 2A	Ständerbau Typ 2B	Elementbau Typ 4A	Elementbau Typ 4B
U-Wert in [W/m ² K]	0,19	0,21	0,21	0,20
Bauteilstärke in [mm]	268	272	276	272
Temperaturverlauf und Wasserdampfsättigungskurve				

Tab. A 9: Übersicht Wandaufbautypen, Typ 2A, Typ 2B, Typ 4A, Typ 4B (Zeichnung: www.ubakus.de)

In einem an das Forschungsprojekt angegliederten Seminar wurden zwei der vier Wandaufbauten als Mockup in 1:1 gebaut und analysiert. Daraus wurde eine optimierte Variante erarbeitet und ebenfalls als Mockup gebaut. Hierfür wurde der Typ 2A (Ständerbauweise) und der Typ 4B (Elementbauweise) gewählt. Durch das Bauen der Mockups und dem Umgang mit dem Material Papier (Vollpappe/ Wellpappe) wurden Erfahrungen für die weitere Bearbeitung des Forschungsprojektes gesammelt.

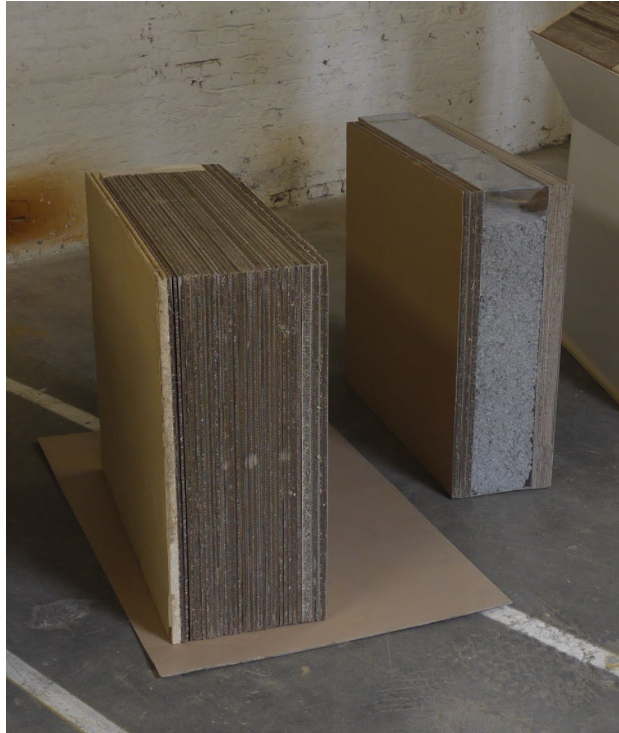
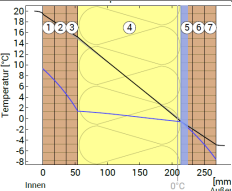
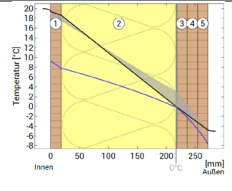


Abb. B 13: Mockup Wandaufbau Typ 2A optimiert und Typ 4B optimiert (studentische Arbeit)

	Ständerbau Typ 2A	Ständerbau Typ 2A optimiert	Elementbau Typ 4B	Elementbau Typ 4B optimiert
U-Wert [W/m ² K]	0,19	0,21	0,20	
Bauteilstärke [mm]	268	272	272	
Abbildung Temperaturverlauf und Wasserdampf- sättigungskurve		Kern aus Zellulose, innere Beplankung Vollpappe		Lehmputz auf Innenseite. Wellpappe im Kern wird abwechslungsweise um 90° gedreht.

Tab. A 10: Optimierung von Typ 2A und Typ 4B (Zeichnung: www.ubakus.de)

Der Bau der Mockups brachte wichtige Erkenntnisse um den Versuchsaufbau und die Testlinge für die experimentelle, raumklimatische Untersuchung in Abschnitt 5.2.3 zu konzipieren.

4.2.2 Betrachtung 2 – Vergleichsreferenzen

Um Papier als Baustoff einzuordnen, werden die zwei Konstruktionsvarianten Ständerbau und Rahmenbau hinsichtlich des (1) U-Werts, (2) des Tauwasseranfalls und der (3) thermischen Masse analysiert und mit zwei Referenzen verglichen. Als Referenz werden einerseits ein konventioneller Leichtbau und andererseits ein konventioneller Massivbau verwendet. Die Frage nach dem sommerlichen Wärmeschutz wird anhand der errechneten thermischen Masse beurteilt. Die hygrothermischen Prozesse im Bauteil werden mittels Glaserdiagramm analysiert. Zur qualitativen Beurteilung des Feuchteschutzes, des Dampfdruckverlaufes und des Sommerlichen Wärmeschutzes wurden die vier Wandaufbauten im Folgenden zwei Referenzwandaufbauten gegenübergestellt:

Konventionelle Holzständerwand

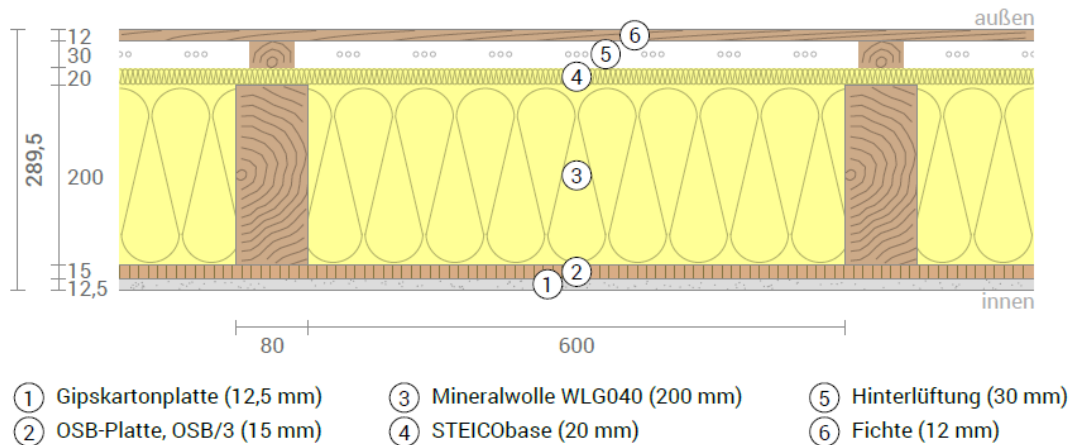


Abb. A 15: Wandaufbau konventionelle Holzständerwand (Zeichnung: www.ubakus.de)

Konventionelle Massivbauweise

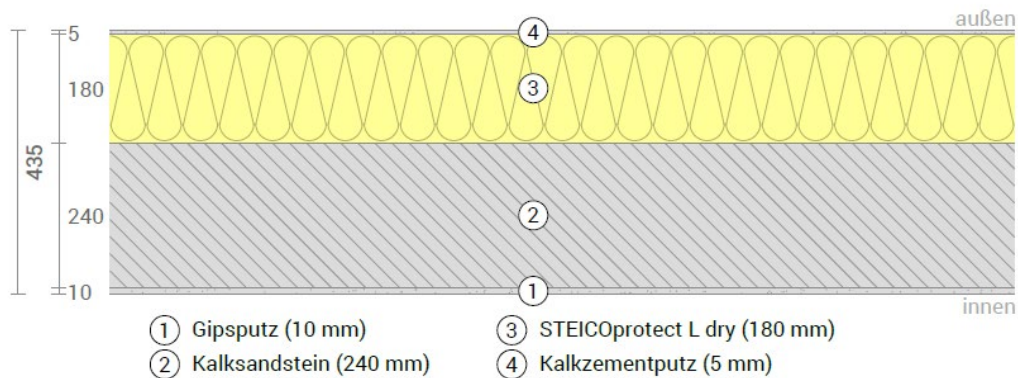


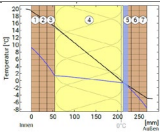
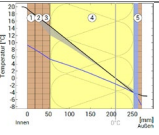
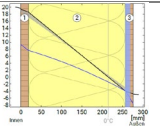
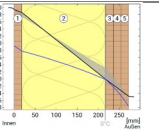
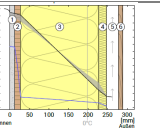
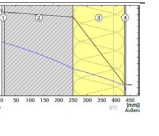
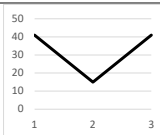
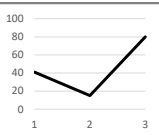
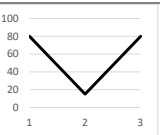
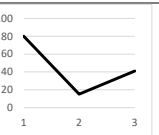
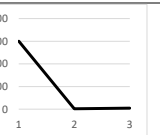
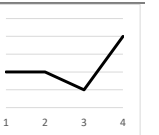
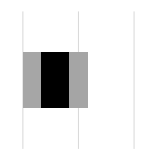
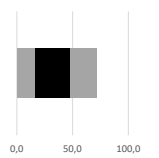
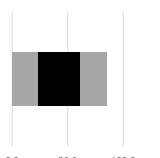

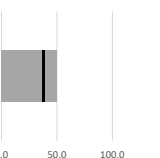
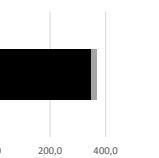
Abb. A 16: Wandaufbau konventioneller Massivbau (Zeichnung: www.ubakus.de)

Für die Berechnungen sind die folgenden vier bauphysikalischen Werte von besonderer Bedeutung (Herleitung der physikalischen Werte vgl. Abschnitt 5.2.1):

- Rohdichte
- Wärmeleitfähigkeit
- Wasserdampfdiffusionswiderstand
- Spez. Wärmekapazität

Zur qualitativen Beurteilung des Feuchteschutzes, des Dampfdruckverlaufes und des sommerlichen Wärmeschutzes wurden der U-Wert, der Tauwasseranfall und die thermische Masse der vier Wandaufbauten und der zwei Referenzen verglichen und folgende Aspekte dargestellt:

- Entsteht Tauwasser und wenn ja in welcher Schicht?
- Verteilung der Dampfdichte im Bauteil.
- Verteilung der Wärmekapazität im Bauteil.

	Typ 2A	Typ 2B	Typ 4A	Typ 4B	Referenz Leichtbau	Referenz Massivbau
U-Wert [W/m ² K]	0,19	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19
Bauteilstärke [mm]	268	272	276	272	290	435
Dampfdruckverlauf						
Verteilung der Dampfdichte						
	Innen und Außen gleich Dicht	Außen dichter als Innen	Innen und Außen gleich Dicht	Innen Dichter als Außen	Innen Dichter als Außen	Ähnlich dicht über das ganze Bauteil
Verteilung der Spez. Wärmekapazität						
Wärmekapazität des Gesamtbauwerks [kJ/m ² K]	58	83	92	79	54	401
/ flächenspez. Gewicht [kg/ m ²]	47	58	59	56	42	379

Tab. A 11: Übersicht der vier Wandkonstruktionen und den zwei Referenzwandaufbauten (Zeichnung: www.ubakus.de)

Bei der Betrachtung der Berechnungen lässt sich folgendes feststellen:

- (1) Bei einem U-Wert von 0,2 W/(m²K) ($\pm 0,01$ W/(m²K)) ergeben sich Wandaufbauten mit einer Stärke von 272mm (± 4 mm). Im Vergleich zum Massivbau mit 435mm ist dies ein weitaus schlankeres Bauteil. Der Leichtbau ist mit 290mm etwas dicker, bewegt sich aber in der gleichen Größenordnung. Diese Beobachtung ist auf die niedrige Wärmeleitfähigkeit (Vollpappe 0,72 W/(m K), Wellpappe 0,51 W/(mK)) von Papier zurück zu führen.
- (2) Bei der Konstruktion Ständerbau 01, Ständerbau 02 und Rahmenbau 01 fällt wenig Tauwasser an. Dies kann innerhalb der Normbedingungen abtrocknen, sodass der ein Tauwassernachweis erfüllt wäre. Bei allen drei Varianten ist ersichtlich, dass die innere Schicht dichter oder gleich dicht ist, wie die äußere Schicht. Nur bei Rahmenbau 02 ist die innere Schicht dichter als die äußere und es fällt kein Tauwasser an. Gleiches ist bei dem Referenz Leichtbau zu beobachten.
- (3) Das flächenspezifische Gewicht der Papierwandaufbauten bewegt sich um 53kg/m² (± 6 kg/m²) und sind vergleichbar mit einem Leichtbau mit von 42kg/m². Die Wärmekapazität liegt bei 75 kJ/m²K (± 17 kJ/m²K) und ist verglichen mit den 54 kJ/m²K des Leichtbaus rund 28% höher. Daraus lässt sich schließen, dass die erhöhte Masse im Kern durch die erhöhte

Rohdichte von Wellpappe gegenüber Mineralwolle zurückzuführen ist, sodass die erhöhte spez. Wärmekapazität den sommerlichen Wärmeschutz verbessert.

Fazit:

Alle vier Konstruktionen aus Papier bewegen sich betreffend Bauteilstärke, Gewicht, Thermischer Masse im Bereich des konventionellen Holzleichtbaus. Wenn Holzplatten (ESB P5) verwendet werden, wirkt sich dies minimal auf den U-Wert und die Wärmespeicherkapazität aus. Wie beim Leichtbau üblich sollte die innere Beplankung dampfdichter sein, als die äußere Beplankung, ansonsten besteht die Gefahr der Tauwasserbildung.

4.2.3 Betrachtung 3 – Wandaufbau

Aufgrund der Beobachtungen aus dem vorhergegangenen Absatz wurde beschlossen, dass Papier als Baustoff in der Logik der Holzleichtbauweise am naheliegendsten ist. Hergeleitet wurde dies aufgrund der folgenden Beobachtungen:

- Der Aufteilung der Funktionen einer Außenwand auf verschiedene Schichten: Beim Holzleichtbau sind die verschiedenen Funktionen der Fassade (Wärmeschutz, Dampfkontrolle, Tragstruktur, usw.) auf einzelne Schichten aufgeteilt. Papierbaustoffe können je nach Produkt und Verarbeitung unterschiedlich Eigenschaften zugewiesen werden. Diese Qualität von Papierbaustoffen wurde sich zunutze gemacht.
- Holz als Rohstoff für Papierprodukte und somit die „Verwandtschaft“ der bauphysikalischen Eigenschaften. Da Papierwerkstoffe aus Holzfasern hergestellt werden, ist es nicht abwegig Papier ähnliche bauphysikalische Werte zuzurechnen wie Holzbaustoffen. Dies ist insofern interessant, da es wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben noch kaum geprüfte bauphysikalische Angaben für Papierwerkstoffe gibt.
- Plattenmaterial als Werkstoff basiert auf Holzfasern und die daraus entstehenden Papierwerkstoffe sind in erster Linie als Plattenwerkstoffe (Vollpappe, Wellpappe, Wabenpappe usw.) oder Schüttungen (Zellulose) verfügbar.
- Die einzelnen Schichten lassen unterschiedlich hohe Wasserdampfdiffusion zu. Wobei die innere Schicht wasserdampfdichter sein sollte als die äußere Schicht.
- Verteilung der thermischen Speichermasse. Wobei die innere Schichte eine höhere thermische Masse als die äußere Schicht aufweist und der Kern dabei wenig thermische Masse trägt.

Konzeptionell an den Holzleichtbau angelehnt, werden über eine Anforderungsmatrix die einzelnen Schichten festgelegt und in der Folge mittels Papierwerkstoffen die Papierbaustoffe konzipiert. Der entstandene Wandaufbau ist für alle drei fachplanerischen Sichtweisen (Konstruktion, Zirkularität, Bauklimatik) die Ausgangslage, um mit den jeweiligen Methodiken die Konzeption des Wandaufbaus zu überprüfen.

Konzeptionell wird der Leichtbau wie folgt beschrieben:

- Beplankung leichter als Kern
- Thermische Masse auf Innenseite
- Innen Dampfdichter als außen

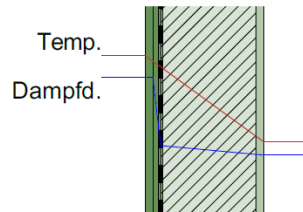


Abb. A 17: Konzept Leichtbauweise

Analog zum Leichtbau wurden der Wandaufbau aufgeteilt in eine innere Beschichtung (Pos. 1.1) und innere Beplankung (Pos. 1.2), einen ausgefachten Kern (Pos. 2.1) inkl. Tragwerksebene (Pos. 2.2), gefolgt von einer äußeren Beplankung (Pos. 3.1) und äußere Beschichtung (Pos. 3.2), so wie eine hinterlüftete Fassadenebene (Pos. 4.0).

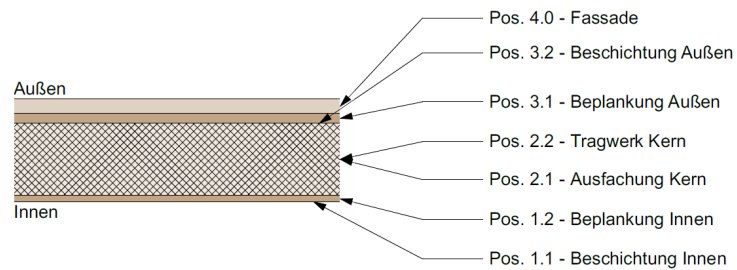


Abb. A 18: Schichten Konzept Papierwandaufbau

Jede der Schichten hat dabei eine bestimmte bauphysikalische und bauklimatische Aufgabe:

Position	Schicht	Bauklimatische Aufgabe	Bauphysikalische Aufgabe
1.1	Innere Beschichtung		
1.2	Innere Beplankung	Thermische Masse Hohe spez. Wärmekapazität, hohe Rohdichte	Dampfkontrolle, dichter als Pos. 3.1 und 3.2
2.1	Ausfachung Kern	Winterlicher Wärmeschutz	Gegebenenfalls zusätzliche thermische Masse
2.2	Tragwerk Kern		
3.1	Äußere Beplankung	Winterlicher Wärmeschutz, überdämmt Ständerwerk	Dampfkontrolle, diffusionsoffener als Pos. 1.1 und 1.2
3.2	Äußere Beschichtung		Dampfkontrolle, diffusionsoffener als Pos. 1.1 und 1.2 Schutz vor Feuchte
4.0	Fassade		

Tab. A 12: Anforderung an die unterschiedlichen Schichten des Papierwandaufbaus

Um die in der Matrix festgehaltenen Anforderungen zu erfüllen, werden zwei unterschiedliche Plattenbaustoffe definiert. Für Pos.1.2 die Karton-Verbundplatte Innen (Bezeichnung: KVP_I01) und für Position 3.1 die Karton Verbundplatte Außen (Bezeichnung KVP_A01).

- KVP_I01: 5x2mm Vollpappe, Vollflächig verklebt mit Weißleim (Ponal, Classic)

Durch die hohe Rohdichte von Vollpappe, sowie die mehrfache vollflächige Verklebung wird bei der KVP_I01 einerseits die thermische Maße maximiert und andererseits die Wasserdampfdurchlässigkeit minimiert.

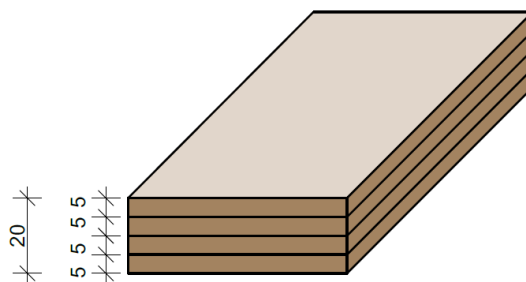


Abb. A 19: Karton Verbundplatte Innen (KVP_I01)

- KVP_A01: 4x 7mm Wellpappe und einer Deckschicht aus Vollpappe, punktuell verklebt.

Durch die geringere Rohdichte und somit geringere Wärmeleitfähigkeit von Wellpappe und das nur punktuelle Verkleben der einzelnen Platte wird bei der KVP_A01 einerseits der Wärmeschutz optimiert und andererseits die Wasserdampfdurchlässigkeit gegenüber dem vorherigen Aufbau maximiert. Die letzte Schicht Vollpappe dient zusätzlich zum Schutz der Wellpappe wie (beispielsweise Stoßen).

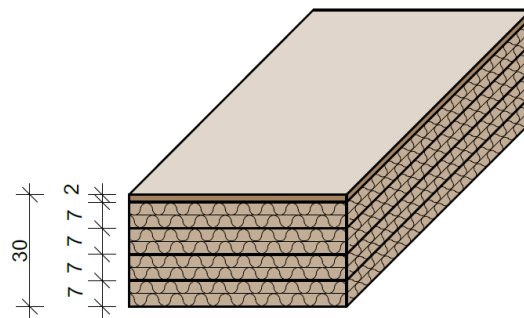


Abb. A 20: Karton Verbundplatte Außen (KVP_A01)

Aus dieser Anforderungsmatrix und im Dialog mit dem ISMD und dem RS wurde der Papierwandaufbau P00_00_00_00 für die weitere Betrachtung festgelegt. P00_00_00_00 dient bei der Bauphysikalischen Prüfung (vgl. Abschnitt 5.2) als Ausgangspunkt.

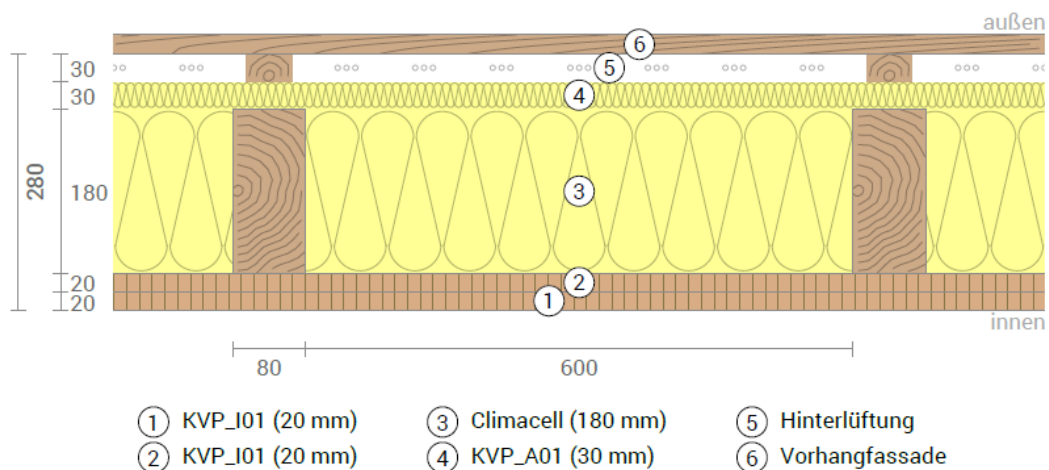


Abb. A 21: Wandaufbau Papierbaustoffe (P00_00_00_00) (Zeichnung: www.ubakus.de)

	P00_00_00_00	Referenz Leichtbau	Referenz Massivbau
U-Wert in [W/m ² K]	0,19	0,20	0,19
Bauteilstärke in [mm]	280	290	435
Dampfdruckverlauf			
Verteilung der Dampfdichte			
	Innen Dicher als Außen	Innen Dicher als Außen	Ähnlich dicht über das ganze Bauteil
Verteilung der Spez. Wärmekapazität			
Wärmekapazität Gesamt [kJ/m ² K]	54	54	401
Gewicht flächenspez. [kg/ m ²]	45	42	379

Tab. A 13: Vergleich – Papierwandaufbau (P00_00_00_00), Leichtbau, Massivbau (Zeichnung: www.ubakus.de)

4.3 Kreislaufkonzept (RB)

4.3.1 Papierwerkstoffe

Aus ökologischer Perspektive stellen Papierwerkstoffe eine Besonderheit dar, weil sie zum einen aus erneuerbaren Rohstoffen hergestellt werden und damit die Bindung von Treibhausgasen in der Wachstumsphase assoziiert wird und sie sich zum anderen -in Abgrenzung zu Holzwerkstoffen- für eine Kreislaufführung eignen. Zwar können großformatige Holzprodukte wiederverwendet werden, eine mehrfache Nutzung auf stofflicher Basis ist jedoch nicht möglich, sondern eine Kaskadennutzung. Um die ökologischen Vorteile von Papierprodukten zu erhalten ist es daher besonders wichtig, die Nachnutzungsmöglichkeiten zu kontrollieren und sicher zu stellen, dass die Verwertungsmöglichkeiten erhalten bleiben. Beschichtungen zum Schutz vor Feuchtigkeit und zur Unterstützung des Brandschutzes haben gezeigt, dass diese zwar den Einsatz von Papierprodukten im Bauwesen wahrscheinlicher machen, aber ihre stofflichen Verwertungsmöglichkeiten nicht mehr bestehen und Verbrennung wahrscheinlich ist.

Lebenszyklusphasen von Papierwerkstoffen: Herstellung

Für die Papierherstellung werden Äste und kleineren Stämmen entnommen, zerkleinert, zerrieben und unter Einsatz von Wasser, Energie und Chemikalien zu Zellstoff verarbeitet werden. Dieser wird durch mehrere maschinellen Schritte weiter in Papier geformt. In Deutschland wird dem Zellstoff ein hoher Anteil Altpapier [Umw22a] beigemischt, wodurch die Mengen an Energie und Wasser deutlich reduziert werden können. Zwar braucht auch die Verarbeitung von Altpapier zu Zellstoff Wasser, Energie und Chemikalien, um z.B. Farbrückstände der Bedruckung zu entfernen, allerdings in deutlich geringeren Mengen, so dass sich ökonomische und ökologische Vorteile ergeben.

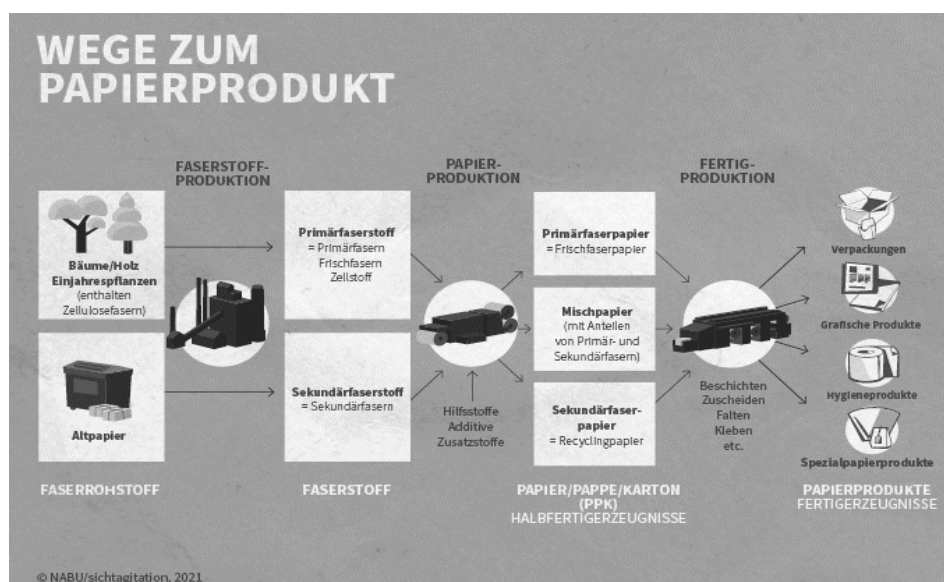


Abb. C: 1 NABU

Aus ökobilanzieller Sicht lassen sich verschiedene Phasen in der Herstellung unterscheiden:

- A1 Rohstoffgewinnung – Gehölz oder Altpapier
- A2 Transport – LKW oder Bahn
- A3 Produktion- Pulpe Entwicklung und Produktherstellung. Bei einer integrierten Papiermühle entfällt der Transport zwischen Standorten. Bei externer Mühle kommt weiterer Transport dazu.

Der Aufwand aus Gehölz Pulpe herzustellen ist ungleich größer als im Vergleich zur Altpapieraufbereitung. Die Zerkleinerung und Säuberung brauchen deutlich mehr Energie und Emissionen als das Lösen der Bedruckung und das Auflösen in den Zellstoff.

Dieser Unterschied lässt sich durch die Mengen von Wasser, Emissionen und Energie quantifizieren.

Dabei ist es entscheidend, ob es sich um Primär- und Sekundärstoff handelt. Die Bearbeitung von Recyclingpapier benötigt bis zu 50% weniger Energie und 15% bis 40% weniger Wasser.

Zellstoff aus primärem Rohstoff kommt nicht selten aus Brasilien, wodurch wenig Transparenz für den Ressourcenkonsum gegeben ist. Wie viel Sekundärmaterial zugemischt werden kann, ist dabei abhängig von der Art des Produktes.

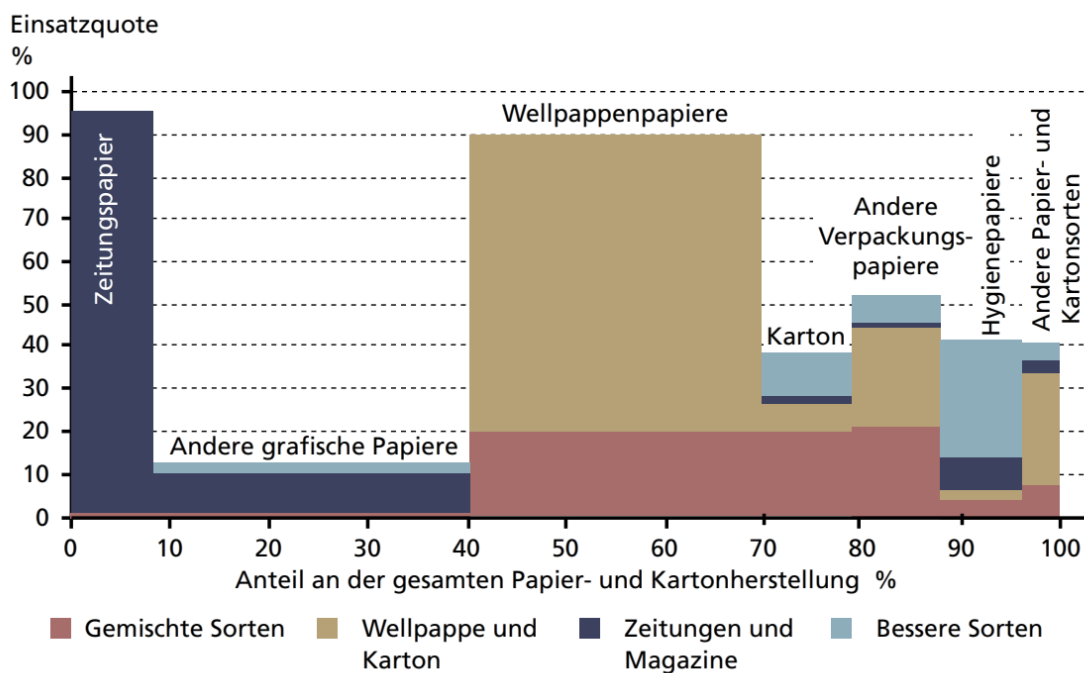


Abb. C 2 Darstellung verschiedener Papierprodukte mit ihrem Ansatz von Sekundärmaterial

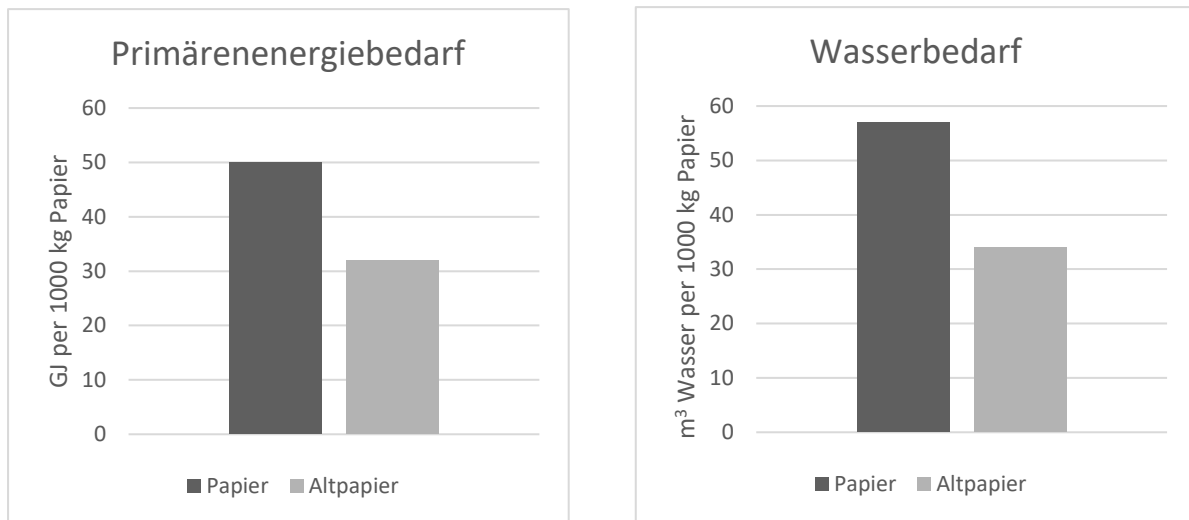


Abb. C 3: Primärenergiebedarf und Wasserbedarf vom Papier und Altpapier [UMB22]

	PENRT	PERT	GWP		Holz	Altpapier
Maßeinheit	[MJ/kg]	[MJ/kg]	[CO ₂ /kg-Äqv./kg]		[kg/kg]	[kg/kg]
Vollpappe Altpapier	4,39	16,00	-1,51		0,00	1,08
Vollpappe (aus Zellstoff)	1,77	18,83	-0,96		1,11	0,36
Wellpappe	4,43	17,76	-0,85		0,38	0,76
Wellstegpappe	4,87	17,95	-0,74		0,38	0,76
Zellulose	1,77	17,89	-1,65		0,00	1,00
Papprohr (Dextrin)	6,73	16,40	-1,14		0,00	0,95
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	11,4	22,8	-1,2		k.A	0,00
Holzfaserdämmplatte	8,9	19,3	-1,2		k.A	0,00
Vollholz Fichte	15,1	k.A	-15,4		0,00	0,00
ESB P5	61,2	k.A	-12,5		0,00	k.A
Dreischichtplatte Fichte	15,1	k.A	-15,3		0,00	0,00

Tab. C 1: Ökobilanz von Papier- und Holzwerkstoffen [BKH20] [Bun21]

In der ökobilanziellen Bewertung werden Papierwerkstoffen negative Werte für das Treibhauspotenzial zugeordnet, die im Zusammen mit der Bindung von CO₂ in der Wachstumsphase des Baums entstehen.

Davon werden Aufwendungen für die Aufbereitungen abgezogen. Daraus ergeben sich etwas schlechtere Werte im Vergleich zu Holzwerkstoffen. Da mehr Energie für die Prozessschritte für die Weiterverarbeitung vom Ausgangsstoff Holz zu Papier im Vergleich Holz zu Holzprodukten entsteht, sind die Werte etwas höher, also schlechter.

In der Gegenüberstellung in der Funktionalität zeigt sich jedoch dass die Eigenschaften in Kombination mit dem geringen Gewicht des Papiers eine gute Gesamtperformance liefern. Wellpappe zeigt für das GWP eine besonders gute Leistung, Zellulose für die Primärenergie aber auch für das GWP.

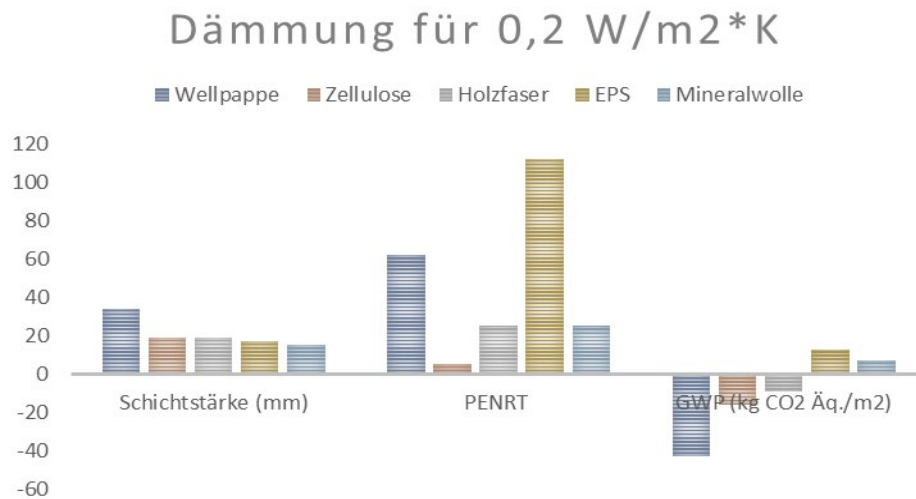


Abb. C 4: Gegenüberstellung Dämmstoffe

Dämmstoff	U-Wert	Gewicht	Schichtstärke	PENRT	GWP
Wellpappe	0,2 W/(m ² K)	50,7 kg/m ²	338 mm	62 kWh/m ²	-43 kg/m ²
Zellulose	0,2 W/(m ² K)	9,7 kg/m ²	193 mm	5 kWh/m ²	-16 kg/m ²
Holzfaser	0,2 W/(m ² K)	7,7 kg/m ²	193 mm	25 kWh/m ²	-9 kg/m ²
EPS	0,2 W/(m ² K)	5,1 kg/m ²	169 mm	112 kWh/m ²	13 kg/m ²
Mineralwolle	0,2 W/(m ² K)	4,7 kg/m ²	155 mm	25 kWh/m ²	7 kg/m ²

Tab. C 2: Vergleich von Dämmstoffen bei gleichem U-Wert [Uba23]

Für den Einsatz von Papierprodukten spricht:

- Ergänzung der Kaskade von Holzwerkstoffen
- Immer noch gute ökologische Eigenschaften im Vergleich zu anderen Produkten
- Erweiterung der Produktpalette aus nachwachsenden Rohstoffen

Nutzung Papierwerkstoffe

Im Vergleich zu anderen Werkstoffen in Bauwesen sind Papierwerkstoffe relativ weich und können ohne Maschinen bewegt und bearbeitet werden. Daraus ergeben sich Vorteile für die Instandhaltung von Papieroberflächen im Innenraum, die Ähnlich wie Gips ausgebessert werden können.

Papierwerkstoffe sind wenig robust und müssen vor Witterungseinflüssen und mechanischen Beeinträchtigungen geschützt werden. Lebensdauern von Bauteilen aus Papier sind bisher nicht veröffentlicht, aber es ist abzuschätzen, dass diese im Bereich von Holzwerkstoffen liegen. Diese Eigenschaften unterstreichen besonders die Nutzung im Innenraum oder als Dämmstoff. Auch für temporäre Konstruktionen sind damit Papierwerkstoffe interessant.

Nachnutzungsmöglichkeiten Papierwerkstoffe

Durch die geringe Robustheit von Papierwerkstoffen wird Wiederverwendung nur in seltenen Fällen möglich sein. Mit hohen Anforderungen an den Rückbau und Logistik ist es aber durchaus denkbar. Auch in Varianten einer hybriden Konstruktion, z. B. mit Holzständerwerk ist es denkbar, dass Bauteile und Produkte wiederverwendet werden.

Die wahrscheinlichere Variante ist die stoffliche Verwertung. Hierfür müssen die Teile frei von wasserfesten Verklebungen und Laminierungen sein, damit eine Integration in Stoffkreislauf möglich ist. Die Wasserstoffbrückenbindungen im Papier, die durch Wasserzugabe gelöst werden, bieten grundsätzlich eine gute Ausgangssituation dafür. Um die problemlose maschinelle Verarbeitung zu gewährleisten, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: sogenannte Sticky bildende Stoffe und untrennbare hydrophob-wirkende Schichten sollten vermieden werden.

Stickys oder klebenden Verunreinigungen sind Störstoffen, Sie sind „kleine, weiche Teilchen, die sich an Maschinenteilen, die mit der Papierbahn in Kontakt kommen, anlagern und weitere Komponenten des Papierstoffs (Fasern, Pigmentteilchen, Additive) binden, so dass sich bis zu Millimeter große Ablagerungen bilden können. Sie führen entweder direkt zu klebenden Ablagerungen oder bilden den Kern von nicht klebenden Ablagerungen.“ [Voß13] Stickys mit einem Durchmesser $> 100 \mu$ bezeichnet man als Makrostickys, die kleineren entsprechend als Mikrostickys.

4.3.2 Bindemittel

Herstellung

Die für das Verbinden von Papierwerkstoffen eingesetzten Klebstoffe lassen sich in drei Gruppen einteilen: Dispersionsklebstoffe, Hot-Melt Kleber und Dextrin Kleber.

- Hot- Melt Kleber sind kunststoffbasierte Klebemittel, meist Thermoplaste, die durch Erhitzen weich und klebend werden und nach Erkalten fest sind.
- Dispersionskleber ist ein verarbeitungsfertiger Klebstoff, der auf Wasserbasis hergestellt wird. Nach Verdunsten des Wassers ist er fest. Je nach Produkt ist er wasserlöslich oder wasserfest.
- Dextrin ist ein modifizierter Stärkekleber, der durch Zugabe vom Wasser aktiviert wird und durch Aufbringen von Wasser löslich ist.

Wegen des hohen maschinellen Aufwands für das Anwenden von Hot-Melt Klebern werden in dem vorliegenden Projekt Dispersionskleber und Dextrinkleber untersucht.

Bei den Klebstoffen sind drei unterschiedliche Arten von Bindungen zu sehen:

- Physikalisch - Adsorptionskräfte wirken zwischen den Atomen und Molekülen.
- Chemisch - Sorptionskräfte wirken zwischen den Atomen und Molekülen.
- Mechanisch - Verklammerung durch Einlagerung in die Oberflächenunebenheiten.

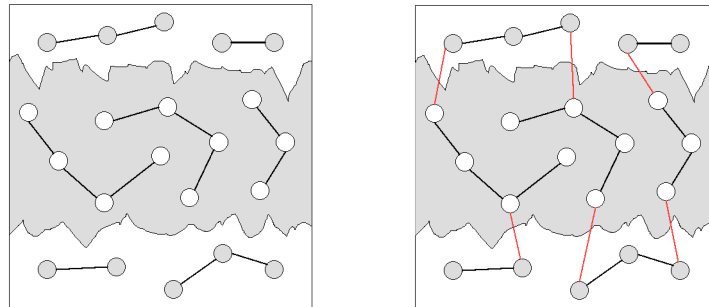


Abb. C 5: links Schema Moleküle mechanische Bindung, rechts Schema physikalischer/chemischer Bindung [Eid06]

Weißleim und Dextrinkleber haben einen relativ begrenzten Haftbereich und benötigen eine raue oder poröse Oberfläche für eine optimale Wirkung. Ihre Bindung mit den Materialien im Fall von Papierwerkstoffen ist rein mechanisch.

Nutzung Bindemittel

Das Einbringen von Dextrin Kleber ist mit Feuchtigkeit verbunden, die nach dem Einsatz im Gebäude entweichen können muss, um keinen Schimmel auszubilden. Eine Trocknung über strombetriebene Geräte würde sich negativ auf die Energie- und Emissionenbilanz auswirken. Auch muss der Bereich vor Feuchtigkeit geschützt werden, so dass der Kleber nicht verflüssigt wird und ablaufen kann. Die Haftkraft ist entsprechend den Anforderungen zu überprüfen.

Hot-Glue wird bei 140-150 Grad Celsius aufgetragen, wird bei 70 Grad Celsius jedoch weich. Es ist denkbar, dass durch z.B. Sonneneinstrahlung Temperaturen dieser Größenordnung erreicht werden. Auch im Falle eines Feuers würde es dazu kommen und die Schichten würden sich voneinander lösen.

Nachnutzungsmöglichkeiten Bindemittel

Es ist zu erwarten, dass Dextrinkleber sich leicht löst und eine Nachnutzung einfach möglich macht. Der Weißleim ist unter Umständen auch wasserlöslich. Seine Haftkraft wird gegenüber Dextrin etwas höher eingeschätzt. Der Hot-Glue kann entweder über das Aufbringen von Temperatur oder mechanisch vom Klebstoff befreit werden. Beide Verfahren scheinen gegenüber dem Lösen mit Wasser aufwendig.

Darauf aufbauen wird in 6.3 das optimale Maß zwischen Haftkraft und Lösbarkeit nach der Nutzung von Papierwerkstoffproben mit Dextrin und Weißleim untersucht.

4.3.3 Mock-Ups

Mit den Erkenntnissen, die in den vorherigen Abschnitten dokumentiert wurden, werden in diesem Kapitel Fassadenausschnitte im Maßstab 1:1 entwickelt und baulich umgesetzt. Die Mock-Ups basieren auf den in 4.1. beschriebenen Typ 2 und 4. Sie haben den gleichen U-Werte von $0,2W/(m^2K)$. Im Fokus hier steht eine kreislaufgerechte Umsetzung. Alle eingesetzten Materialien sollen einen möglichst geringen Treibhausgasemissionen binden und dekonstruierbar entwickelt werden. Zentrale Punkte der konstruktiven Untersuchung waren die Ausbildung des Wandknicks und die Zusammenbindung der Pappschichten für die Dämmpanelle, die bei allen drei aus Wellpappe bestanden.

Prototyp 1 (Rahmenbau):

Die Tragstruktur ist aus Papprohren ausgebildet, die durch Holzknoten verstärkt werden. Auf die verzapfte Holzverbindung werden die Röhren gesteckt und somit eine stabile Verbindung hergestellt ohne die Röhren zu schwächen. Ein Knotenpunkt aus Papierwerkstoffen wäre ebenfalls denkbar gewesen, wurde jedoch aufgrund der schlechten Eigenschaften der Tragfähigkeit an diesem konstruktiv stark beanspruchten Punkt ausgeschlossen. Zur Lagesicherung werden die Papprohren und das Holz verschraubt.

Für die Gefachdämmung wurde Wellpappe zu Paketen vernäht. Dafür wurden Löcher mit einer Stechahle in die Pappe gestochen und lose Wellpappen mit einem Faden auf einer Nadel vernäht. Die Dämmpakete passen sind die Fächer zwischen den Ständern und sind dabei minimal kleiner. Toleranzen in der Konstruktion können dadurch gut aufgenommen werden.

Für die bessere Dekonstruktion wurden punktuell Schrauben in das Ständerwerk eingebracht. Der Holzverbinder ist im Wesentlichen gesteckt und ebenfalls nur durch Schrauben gesichert.

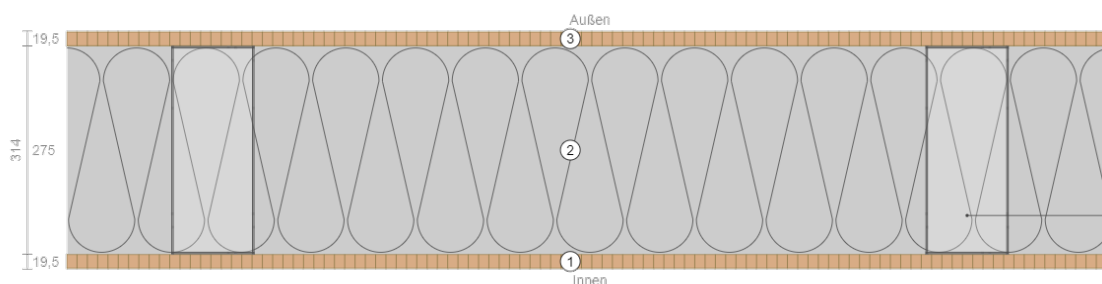


Abb. C 6: Wandaufbau Prototyp 1

Schicht	Material	Stärke (mm)
1	Pappsandwich	19,5
2	Wellpappe	275
3	Pappsandwich	19,5
Tragwerk	Papprohr (275x110)	275

Tab. C 3: Wandaufbau Prototyp 1

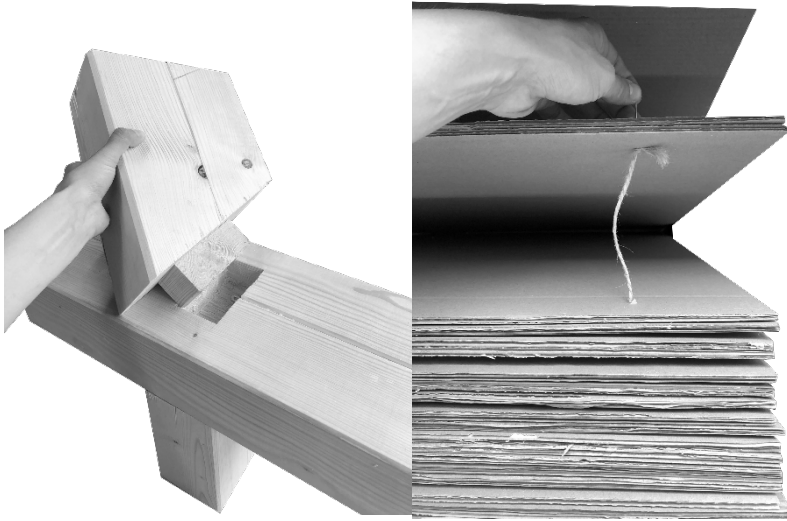


Abb. C 8: Vollholzknotenpunkt

Prototyp 2 (Rahmenbau):

Dieser Prototyp besteht aus einer Holzkonstruktion, die ähnlich wie P1 mit Wellpappepaketen ausgefacht sind. Die Konstruktion wird mit Nut und Feder System gehalten und ist beidseitig mit ESB-Platten beplankt. Die drei Teile des Rahmens - Träger, Ständer und Platte - sind auf der gleichen Kraftlinie von oben nach unten mit der Feder verbunden. Die restlichen Bauteile sind durch Schrauben an der Tragkonstruktion befestigt.

Die einzelnen Dämmpakete sind in der Konstruktion mit Nut und Feder gesichert. Die horizontale Rahmenkonstruktion ist mit zwei kleinen Holzleisten an der Ober- und Unterseite verschraubt, und die vertikalen Rahmen sind gefräst, um die dazu passenden Nuten zu erzeugen. Die Pakete sind ähnlich wie im vorherigen Prototyp mit nach einer Bohrung durch die Pappe mit einer Kordel verbunden.

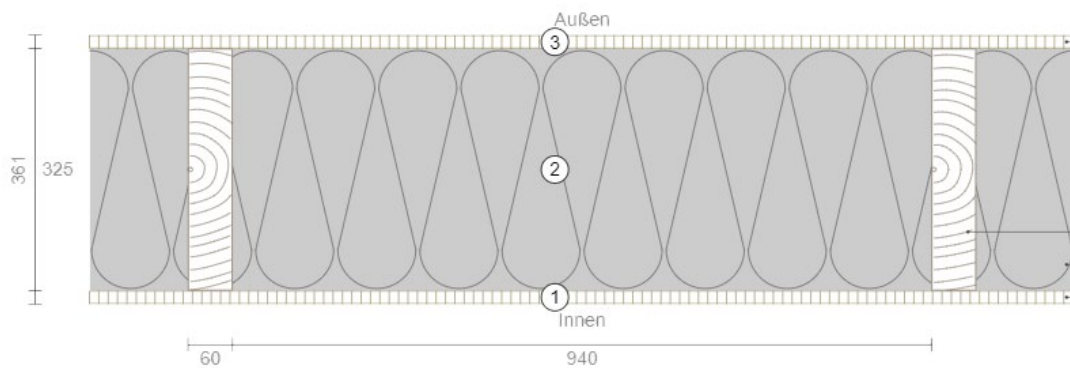


Abb. C 9: Wandaufbau Prototyp 2

Schicht	Material	Stärke (mm)
1	OSB-Platte	18
2	Wellpappe	325
3	OSB-Platte	18
Tragwerk	Konstruktionsholz (325x60)	325

Tab. C 4: Wandaufbau Prototyp 2

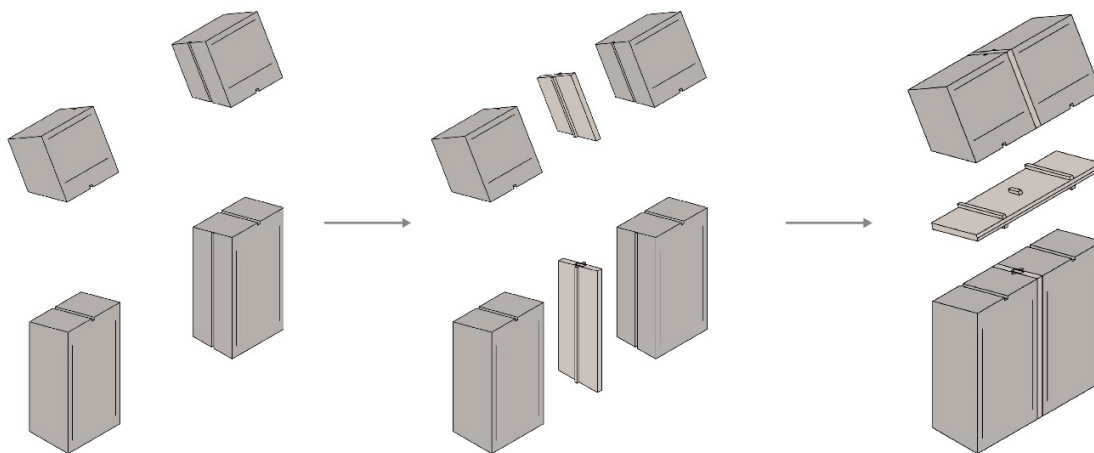


Abb. C 10: Explosionszeichnung

Prototyp 3 (Rahmenbau):

Auch bei diesem Prototyp handelt es sich um ein Holzständerwerk mit Dämmpaketen aus Wellpappe. Um die Menge von Konstruktionsholz zu reduzieren, ist hier ein IPE Holzträger genutzt worden. Der Knick in der Wand ist konstruktiv durch eine Verbindungsplatte befestigt. Sie ist an den beiden Holzbalken, die sich auf Gehrung treffen, verschraubt. Für höhere Stabilität ist sie im Steg, zwischen den beiden Flanschen positioniert, was den Knotenpunkt steifer macht.

Bei diesem Prototyp sind die Wellpappen mit Kreppband zusammengebunden und zwischen den Holzbalken gelegt. Sie sind in ihrer Position nur durch Pressen von den Außen- und Innenplatten gehalten. Die OSB-Platten sind durch Schrauben in der Tragkonstruktion montiert und von der Innenseite für eine saubere Oberfläche ist alles mit einer Vollpappe Schicht verdeckt.

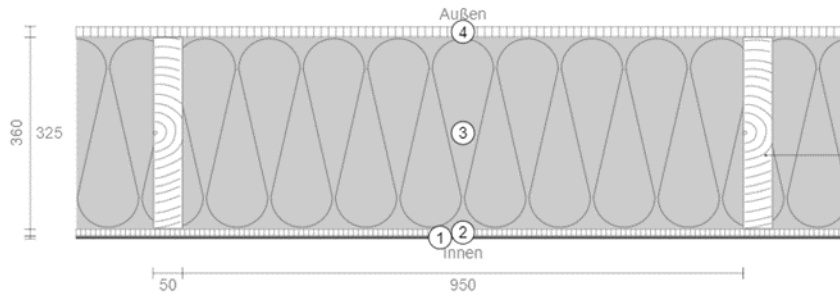


Abb. C 11: Wandaufbau Prototyp 3

Schicht	Material	Stärke (mm)
1	Vollpappe (2x 1,5 mm)	3
2	OSB-Platte	12
3	Wellpappe	325
4	OSB-Platte	18
Tragwerk	Konstruktionsholz (325x50)	325

Tab. C 5: Wandaufbau Prototyp 3



Abb. C 13: Holzverbindungsplatte

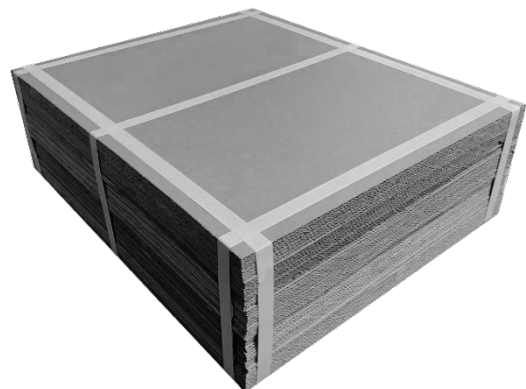


Abb. C 12: Wellpappedämmung

Zwischenfazit

Diese drei Prototypen in der ersten Phase beschäftigen sich vor allem mit der Konstruktion, Fügeprinzipien und die klebefreie Bindung der Dämmpanelle. Es stellt sich heraus, dass diese Dämmpakete aus Wellpappe sehr voluminös sind, um den Zielwert von $0,2W/(m^2K)$ zu erreichen. Deswegen untersuchen die weiteren drei Mock-Ups Zellulose und Zellulose-Wellpappe Kombinationen, damit die Wandstärke geringer wird. Da die konstruktive Ausbildung des Knicks kein Objekt vom Test ist, sind die Bauten nur 1x1m nur in der vertikalen Ebene.

Bei den ersten Prototypen ist das Tragwerk eine Zusammenfügung aus unterschiedlichen Holzlatten und kleineren Balken, um schlankere Profile zu schaffen. Wellpappe als Dämmstoff ist wie in 5.3 dargestellt ökologisch vorteilhaft, führt aber zu sehr hohen Wandstärken. Es ist anspruchsvoll eine Konstruktion mit $\geq 30\text{cm}$ Querschnitt herzustellen. Aus statischer Sicht bedeutet dies eine

Überdimensionierung und führt zu enormen Holzmengen, die nicht wirtschaftlich sind. Deswegen ist eine Reduzierung der Dämmschicht ein erstrebenswertes Ziel.

Prototyp 4 (Rahmenbau):

Prototyp 4 ist vergleichbar mit Prototyp 3 mit dem Unterschied, dass die einzelnen Schichten der Wellpappe-Dämmung mit Stärkekleber vollflächig verbunden sind. Das erlaubt eine präzisere Herstellung der Dämmpanelle und vermeidet die Formung von Lufträumen wegen gebogener Pappen und Aufstaplungsungenauigkeiten, die bei dem Seil/Korde und Kreppband Bindungen zu sehen sind. Vom Außen und Innen ist die Konstruktion mit OSB-Platten verkleidet und alle Teile sind verschraubt.

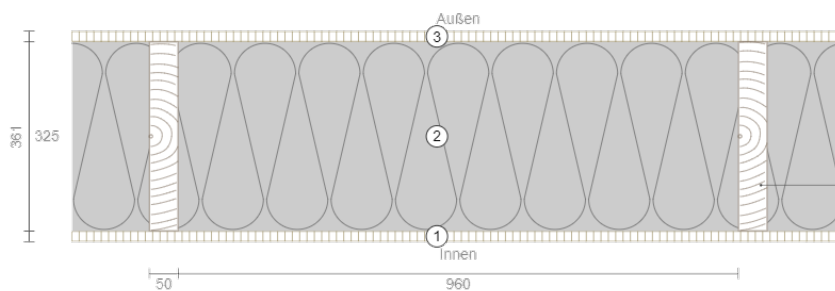


Abb. C 14: Wandaufbau Prototyp 4

Schicht	Material	Stärke (mm)
1	OSB-Platte	18
2	Wellpappe	325
w3	OSB-Platte	18
Tragwerk	Konstruktionsholz (325x50)	325

Tab. C 6: Wandaufbau Prototyp 4

Prototyp 5 (Rahmenbau):

Bei Prototyp 5 wird Zellulose als Dämmung eingesetzt. Dadurch kann die Dämmschicht fast halbiert werden. Da die Zellulose ein loses Material ist muss sie entweder in einer Membrane oder Kissen gefüllt werden, die später zwischen den Platten gepresst werden oder nach der Fertigstellung der Konstruktion durch eine vorgeplante Öffnung in der Platte oder seitlich im Rahmen eingeblasst werden. Diese Öffnung muss nach der Erstellung des Wandsegments wasserdicht geschlossen werden, aber für die zukünftige Demontage abnehmbar sein. Hier wird auf der Innenseite die experimentelle Karton Verbundplatte eingesetzt, die in diesem Kapitel erläutert wird.



Abb. C 15: Wandaufbaufoto

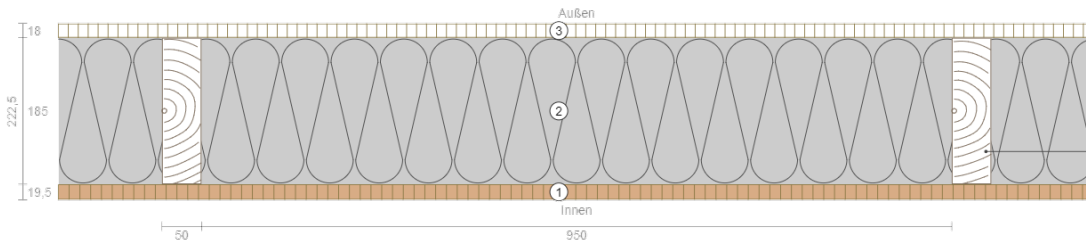


Abb. C 16: Wandaufbau Prototyp 5



Schicht	Material	Stärke (mm)
1	Karton Verbundplatte	19,5
2	Zellulose	185
3	OSB-Platte	18
Tragwerk	Konstruktionsholz (185x50)	185

Tab. C 7: Wandaufbau Prototyp 5

Abb. C 17: Wandaufbaufoto

Prototyp 6 (Rahmenbau):

Prototyp 6 ist eine hybride Variante aus Zellulose und Wellpappe. Die Dämmschichttiefe ist geringer als die Wellpappe Paneele, aber etwas dicker als die Zellulosevariante (Prototyp 5). Hier sind die Pappschichten wieder vollflächig mit Stärkekleber verbunden, und damit die erforderliche Separation für die Zellulose schichten gewährleistet ist, sind an mehreren Stellen dazwischen Abstandshalter aus Karton geklebt. Im Kontrast zu Prototyp 5 ist hier eine Düse von vorne unmöglich, da sie theoretisch über mehrere Schichten, die sich unabhängig voneinander bewegen können, spannen muss. Aus diesem Grund ist die einzige Option die Zellulose nach Fertigstellung des Segments von oben eingeblasst zu werden, bevor alles mit der Querholzverbindung zugemacht wird.

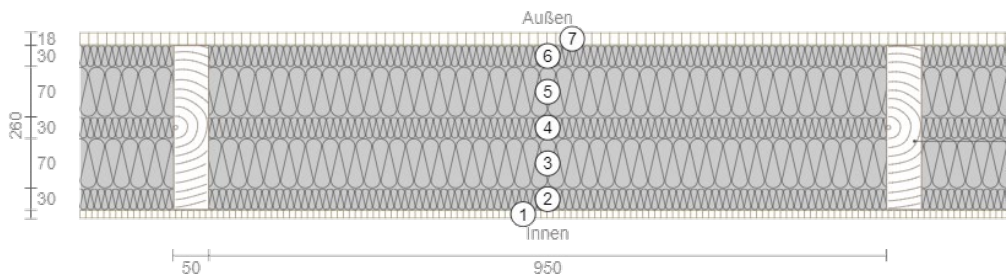


Abb. C 18: Wandaufbau Prototyp 6



Abb. C 19: Wandaufbaufoto

Schicht	Material	Stärke (mm)
1	OSB-Platte	12
2	Wellpappe (5 x 6 mm)	30
3	Zellulose	70
4	Wellpappe (5 x 6 mm)	30
5	Zellulose	70
6	Wellpappe (5 x 6 mm)	30
7	OSB-Platte	18
Tragwerk	Konstruktionsholz (185x50)	185

Tab. C 8: Wandaufbau Prototyp 6

5 Experimentelle Evaluation

5.1 Statik und Brandschutz (ISMD)

5.1.1 Brandschutz

5.1.1.1 Allgemeines

Da es sich bei dem Entwurfskonzept um ein eingeschossiges, freistehendes Gebäude mit geringer Nutzfläche handelt, ist es gemäß §2.3 der Hessischen Bauordnung (HBO) [Hes19] in Gebäudeklasse 1 einzuordnen. Für Gebäude dieser Art gelten im Allgemeinen die niedrigsten Brandschutzanforderungen, was im Wesentlichen die Verwendung von Baustoffen der Klasse B2 gemäß DIN 4102 [Deu98] erfordert. Hier ist vor allem die Feuerwiderstandsfähigkeit der Beplankung von Belang, da diese in einem Brandereignis zuerst den Flammen ausgesetzt wäre. Da an den beteiligten Universitäten kein geeigneter Versuchsstand für einen Brandversuch nach DIN 4102 verfügbar war, wurde ein vergleichendes Experiment durchgeführt.

Auch wenn die hessische Bauordnung diese nicht explizit nennt, ist die Feuerwiderstandsfähigkeit des Ständerwerks ebenfalls von Bedeutung für die Resttragfähigkeit einer Konstruktion im Falle eines Feuers. Während diese bei einer Verwendung eines Holz-Ständerwerks bereits erprobt und bekannt ist, ist sie hinsichtlich eines Ständerwerks auf Pappröhren noch zu überprüfen. Mangels eines geeigneten Versuchsstands wurde ein entsprechendes Experiment jedoch nicht durchgeführt. Geht man vom üblichen Brandverhalten eines Vollholz-Querschnittes, welcher an seiner Außenseite verkohlt und hierdurch zunächst eine Schutzschicht gegen weitere Beflammung bildet, als Referenz aus, ist jedoch anzunehmen, dass ein Hohlquerschnitt aus Karton eine deutlich schlechtere Performance aufweisen wird. So ist es absehbar, dass ein solches Profil sobald seine dünne Wandung einseitig abgebrannt ist keinen nennenswerten Widerstand mehr gegen Biegung beziehungsweise Knicken leisten könnte.

Für die Versuche wurden, unter Aufsicht der Freiwilligen Feuerwehr Dreieich-Offenthal, jeweils eine ESB-Holzwerkstoffplatte und eine Karton-Verbundplatte, beide im Format 675x1000x18mm, senkrecht eingespannt aus ca. 20cm Entfernung händisch mit einem Gasbrenner beflammt. Das Brandverhalten beider Probekörper wurde mit Serienbildaufnahmen in Schritten von je 10sek pro Auslösung dokumentiert. Zudem wurde die Zeit gestoppt, bis sich ein Loch durch das Material gebrannt hatte und anschließend das Experiment beendet und der Probekörper gelöscht.



ABB. B 146: Aufbau Brandversuche

5.1.1.2 Brandversuch 1 - ESB-Platte

Die ESB-Platte diente als Referenzobjekt, da sie bereits marktverfügbar ist und als ökologisch unbedenkliches Beplankungsmaterial im Holzbau eingesetzt wird. Bedingt durch ihre Marktverfügbarkeit wurde sie gemäß EN 13501-1 [Eur18] auf ihr Brandverhalten geprüft und erreichte Klasse D-s2, d0, was nach DIN 4102-1 der Klasse B2/Normalentflammbar entspricht.

Im Versuchsverlauf konnte zuerst eine Verkohlung der Oberfläche beobachtet werden, welche sich schützend auf das darunter liegende Material auswirkte. Im Zuge der Verkohlung zeichneten sich die einzelnen Späne, aus denen die Werkstoffplatte verpresst wurde durch das Zusammenziehen der Oberfläche deutlich als Erhebungen ab, zwischen denen sich kleine Risse auftaten. Nach etwa 1:10min wurde, ausgehend von diesen Rissen am Rand der Späne erste Asche sichtbar, welche sich folgend im Bereich der direkten Beflammung weiter ausbreitete. Zudem kam es, zu einer konkaven Verformung der Platte in Richtung der Beflammung, welche vermutlich ebenfalls durch das Zusammenziehen der Fasern ausgelöst wurde. Nach 11:10min hatte sich die Flamme durch den Probekörper gefressen und wurde auf der Rückseite sichtbar. Eine Glut entstand ausschließlich im Zentrum der auftreffenden Gasflamme und arbeitete sich langsam durch den Versuchskörper. Auch nach Beendigung der direkten Beflammung entzündete sich die Platte nicht, sondern glühte nur um das Loch herum weiter.



ABB. B 157: Brandversuch ESB: 0:30min Verkohlung / 1:10min Asche / 6:10min Glut im Zentrum / 11:10 Durchbruch

5.1.1.3 Brandversuch 2 – Karton-Verbundplatte

Die getestete Karton-Verbundplatte bestand aus 11 kreuzweise verleimten Lagen Vollpappe mit einer Gesamtstärke von 18mm und wurde in gleicher Weise wie zuvor getestet. Nachdem in den ersten 0:10min ebenfalls eine Verkohlung einsetzte, die jedoch nicht mit der spanbedingten Rissbildung einherging, waren bereits nach 0:40min deutliche Flammen sichtbar. Die Oberfläche riss auf und rollte sich von der beflamten Stelle aus Lagenweise nach außen. Die so entstehenden dünnen Papierlagen brannten ab und wurden zu Asche, während sich von innen her immer weitere Lagen aufrollten und das Feuer weiter nährten. Durch die Aufsteigende Hitze dehnte sich die Brandstelle nach ca. 3:10min nach oben in Richtung des Plattenrandes aus. Auch wenn die Karton-Verbundplatte auf der beflamten Seite ein deutlich aktiveres Brennverhalten zeigte als die ESB-Platte, dauerte es 10:20min bis sich die Flammen durch das Material gearbeitet hatten. Im Gegensatz zur ESB-Platte jedoch, brannten die aufgerollten Papierlagen auch nach Ende der Beflammung mit offener Flamme weiter.



ABB. B 168: Brandversuch Karton: 0:10min Verkohlung / 0:40min Flammen / 3:10min Ausbreitung bis zum oberen Rand / 10:20 Durchbruch

5.1.1.4 Fazit

Auch wenn die Karton-Verbundplatte auf der beflamten Seite ein deutlich dynamischeres Brandverhalten zeigte als die Holzwerkstoffplatte, wird der Versuchsausgang als vielversprechend bewertet, da der Durchbruch der Flammen nur 50 Sekunden früher als bei der ESB-Platte erfolgte. Es ist davon auszugehen, dass eine größere Materialstärke zu einer weiteren Verzögerung des Durchbruchs führen würde. Da das Experiment lediglich vergleichend zwischen zwei Probekörpern stattfand, wurden mit ihm lediglich erste Anhaltspunkte für das Brandverhalten einer Karton-Verbundplatte ermittelt. Ein qualifizierter Brandversuch gemäß DIN4102 [Deu98] zur Klassifizierung der Verbundplatte wird für das Folgeprojekt empfohlen.

5.1.2 Statik

5.1.2.1 Allgemeines

Da die Herstellung der ersten Mock-Ups gezeigt hat, dass die für die Beplankung verwendete Karton-Verbundplatte durch ihre Kernlage aus Wellpappe keine ausreichende Stabilität bietet, wird stattdessen eine Verbundplatte aus mehreren Lagen Vollpappe verwendet. Ihr Aufbau entspricht der schon im vorigen Kapitel geprüften Platte aus 11 kreuzweise verleimten Lagen mit einer Gesamtstärke von 18mm. Erneut wurden vergleichende Experimente mit einer 18mm starken ESB-Platte durchgeführt, wie sie im konventionellen Holzständerbau zum Einsatz kommt. Aus konstruktiver Sicht dient die Beplankung von Holzständerbauten der Queraussteifung der Wände durch ihre Scheibenwirkung.

Zur Untersuchung der Tragfähigkeit wurden verschiedene Versuche durchgeführt, bei denen jeweils ein direkter Vergleich konventioneller Baustoffe und Bauweisen mit ihren Pendanten aus Karton durchgeführt wurde:

Versuch 1: Bauteilprüfung einer Wandscheibe unter Horizontallast

- (a) mit ESB-Beplankung
- (b) mit Beplankung aus Karton-Verbundplatte

Versuch 2: Materialprüfung auf Scherfestigkeit

- (a) ESB
- (b) Karton-Verbundplatte

Versuch 3: Materialprüfung auf Druckfestigkeit

- (a) mit stehender Orientierung der Wellpappe
- (b) mit liegender Orientierung der Wellpappe

Neben dem Vergleich der konventionellen Beplankung mit ESB und der Vollpappe wurde untersucht, ob die Verwendung von Wellpappe als Gefachdämmung als Alternative zur ebenfalls diskutierten Zelloseschüttung eine positive Auswirkung auf die Stabilität der Wandscheibe hat. Der Einfluss der Orientierung der Wellpappe auf die Tragfähigkeit wird aus den Ergebnissen des dritten Experimentes deutlich.

5.1.2.2 Versuch 1 - Bauteilprüfung einer Wandscheibe unter Horizontallast

Im Fokus der Untersuchung stand die Widerstandskraft der Verbundplatte gegenüber Scheibenschubbeanspruchung im System einer Wandscheibe. Hierbei können zwei Nachweise für das Versagen der Wandscheibe maßgebend werden:

- Versagen der Verbindungsmittel am Rand durch Abscheren
- Versagen der Beplankung durch Überschreiten der zulässigen Schubspannung

Das Ausbeulen der Beplankung in Folge von Schubbeanspruchung kann gem. DIN EN 1995-1-1:2012, Abschnitt 9.2.4.2 (11) [Deu98] vernachlässigt werden, sofern für den Pfostenabstand b_{net} der Rahmen und die Beplankungsdicke t folgender Nachweis eingehalten ist:

$$\frac{b_{net}}{t} \leq 100$$

Übertragen auf das vorliegende System bedeutet dies:

$$33,06 \leq 100$$

womit der Nachweis als eingehalten gesehen werden kann.

Allen Probekörpern gemein war ein Holzrahmen, bestehend aus Konstruktionsvollholz im Querschnitt 8x16cm mit Außenmaßen von 67,5x100cm. Zwei dieser Rahmen erhielten eine beidseitige Beplankung mit ESB-Holzwerkstoffplatten, während die anderen zwei beidseitig mit der Karton-Verbundplatte beplankt wurden. Zudem wurde je ein ESB- und ein Karton-Beplankter Rahmen mit einer

Gefachdämmung aus Wellpappen ausgestattet. Von einer Füllung der verbliebenen Rahmen mit Zelluloseschüttung wurde abgesehen, da ihr Beitrag zur Queraussteifung durch ihr loses Gefüge vernachlässigbar ist. Die Verbindung der Rahmenhölzer wurde als stumpfer Stoß mit je sechs Holzschrauben pro Ecke ausgeführt. Die Beplankungen wurden mit Holzschrauben im Abstand von etwa 15cm umlaufend mit dem Holzrahmen verbunden.

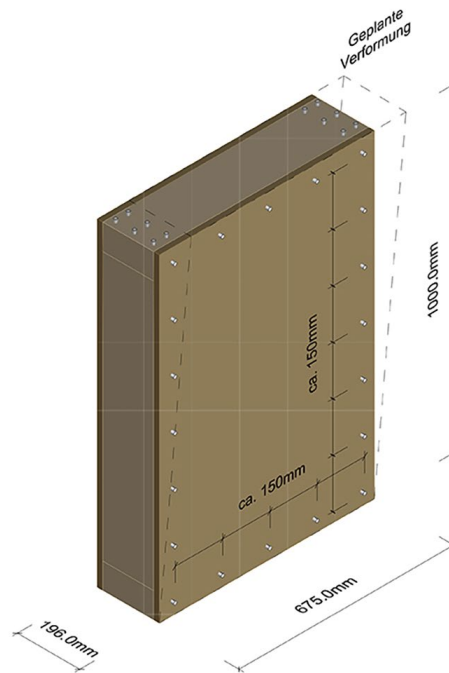


ABB. B 179: Probekörper Bauteilversuch, Aufbau und Maße

Der Versuchsaufbau orientiert sich an dem Vereinfachten Nachweises von Wandscheiben in Holz-Rahmenbauweise gem. DIN EN 1995-1-1:2010-12 [Deu98]. Analog zu diesem Nachweis wurden die Probekörper in einem Versuchsstand an ihrer kurzen Seite eingespannt und auf der gegenüberliegenden Seite mit einem Hydraulikzylinder am Wandkopf eine Einzellast eingeleitet. Messtechnisch erfasst wurde die Einwirkung über eine auf dem Hydraulikzylinder angeordnete Kraftmessdose. Die an der parallel zur Lasteinleitung gemessene Verschiebung ermöglicht die Darstellung einer Last-Verformungs-Kurven je Bauteil.

Zwar konnte für die Konstruktion, welche mit der Karton-Verbundplatte beplankt war, eine geringfügig höhere Anfangssteifigkeit nachgewiesen werden, jedoch wird dieser Unterschied aufgrund der zu kleinen Vergleichsgruppe als statistisch problematisch erachtet. Aus der gemessenen Last-Verformungskurve konnte ermittelt werden, dass beide Probekörper ein ähnliches Verhalten zeigten und auch ähnliche Werte hinsichtlich ihrer maximalen Kraftaufnahme aufwiesen (ESB: 13.676N , Karton: 14.122N). Dies wird darauf zurückgeführt, dass die Steifigkeit im Wesentlichen vom Holzrahmen herrührte.

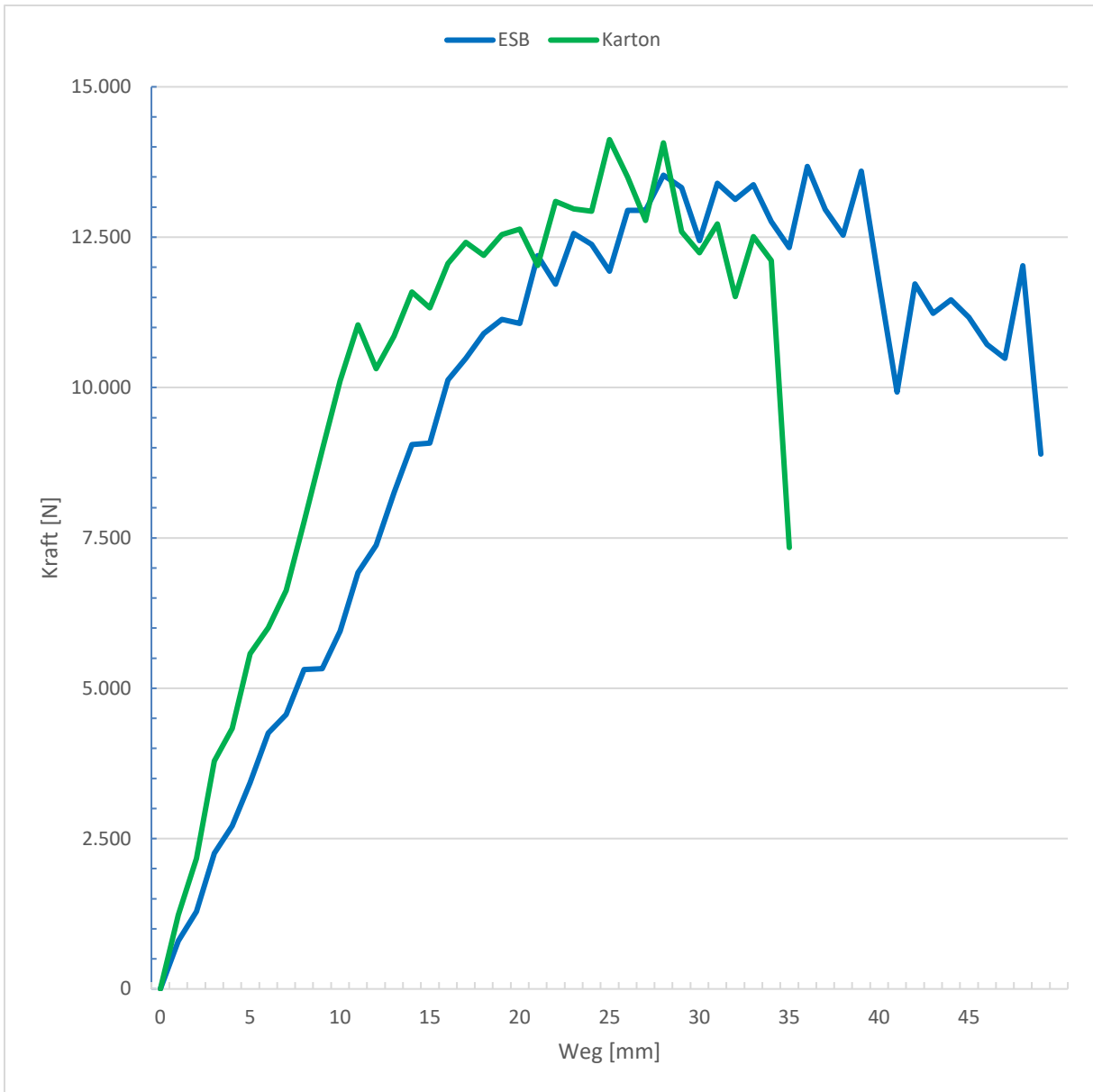


ABB. B 20: Last-Verformungskurve Bauteilversuch



ABB. B 21: Versuchsaufbau Bauteilversuch (links) Versagen der Beplankungs-Befestigung(rechts)



ABB. B 22: Rahmenversagen bei ESB-Beplankung (links) und Karton-Beplankung(rechts)

Auch hinsichtlich des Versagensbildes wurde die Annahme bestätigt, dass die Karton-Verbundplatte ein geeigneter Ersatz für Holzwerkstoffplatten ist. Bei beiden Probekörpern blieb, wie anhand des zuvor diskutierten Nachweises ein Schubbeulen aus. Ob die vorliegende Gleichung jedoch uneingeschränkt für die statische Bemessung einer Beplankung aus Vollpappe angewendet werden kann, müsste noch verifiziert werden. Beim ersten beobachteten Versagen handelte es sich um die Befestigungsmittel, mit welchen die Beplankung am Rahmen befestigt wurde. Kurz darauf zeichnete sich ein Auseinanderscheren an den Rahmenecken ab, als auch an diesen Stellen die Befestigungsmittel nachgaben.

5.1.2.3 Versuch 2 - Materialprüfung auf Scherfestigkeit

Zum Vergleich der Scherfestigkeit beider Beplankungsvarianten wurde in einer zweiten Versuchsreihe ein Scherversuch durchgeführt, bei dem in einer Zugprüfmaschine mit entsprechenden Adapterstücken ein Scherversuch durchgeführt wurde. Der Versuchsaufbau des Schubversuchs bestand aus einem knochenförmigen Probekörper, welcher an seiner dünnsten Stelle eine Schnittfläche von 10x18mm aufwies. Dieser wurde in eine Halteeinrichtung eingespannt, welche die von beiden Seiten auftretenden Zugkräfte exzentrisch in den Probekörper einleitete.



ABB. B 23: Schubversuch, Aufbau (links) und Probekörper nach dem Versuch (rechts)

Es wurden je fünf Probekörper aus beiden Materialien hergestellt und getestet, sowie ein zusätzlicher aus ESB für einen ersten Testlauf der Prüfeinrichtung. Gemessen wurden die aufgewendete Zugkraft in N, sowie der zurückgelegte Weg in mm. Die geprüften Probekörper sind in der obenstehenden Abbildung dargestellt (ESB links und Pappe rechts).

Im Experiment wurden für ESB maximale Schubfestigkeiten im Bereich von 769 bis 1019 N ermittelt, wobei der Mittelwert bei 738N lag. Die Karton-Verbundplatten wiesen maximale Schubfestigkeiten im Bereich von 1235 bis 1487 N auf, bei einem Mittelwert von 1252 N. Im direkten Vergleich beider Materialien konnte durch das Experiment eine im Mittelwert um ca. 69% größere Schubfestigkeit der Karton-Verbundplatte ermittelt werden. Zudem wurden die Maximalwerte bei der ESB-Platte nach 5,0 bis 6,6mm zurückgelegtem Weg beobachtet werden, bei einem Mittelwert von 5,2mm. Die Karton-Verbundplatte erreichte die jeweiligen Maxima erst zwischen 6,0 und 8,7mm bei einem Mittelwert von 7,1mm, was auf eine höhere Elastizität schließen lässt.

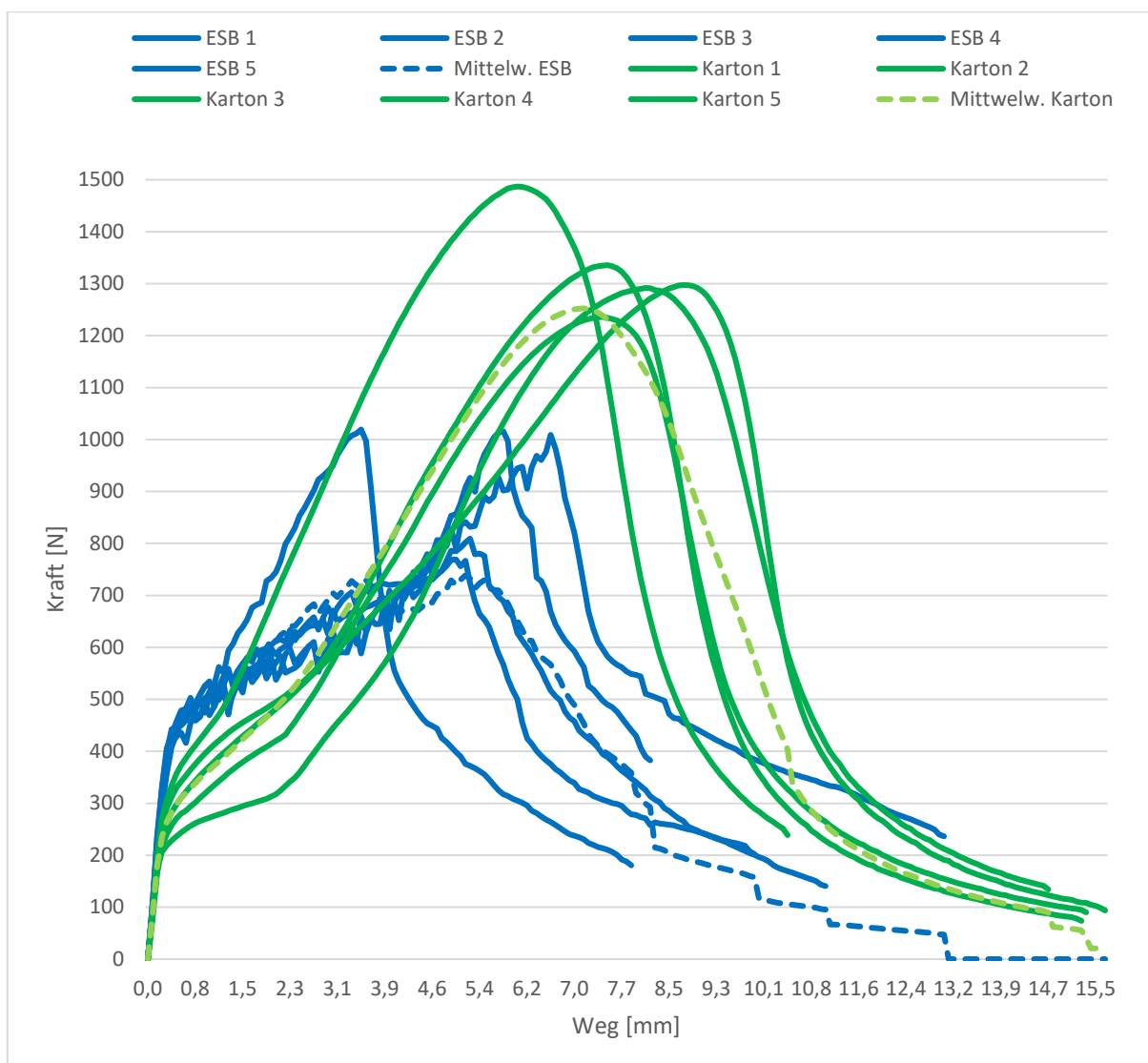


ABB. B 24: Last-Verformungskurve Schubversuch

Betrachtet man das Diagramm, in welchem die Versuchsreihen gegenübergestellt werden, so bildet sich der feinfaserige Aufbau des Kartonmaterials in einer homogen wirkenden Kraftkurve ab, während die aus größeren Spänen zusammengesetzte ESB-Platte ein eher sprunghaftes Bruchverhalten zeigte. Auch im Schadensbild der Probekörper zeigte sich beim ESB eher ein Splintern, während bei der Karton-Verbundplatte ein Reißen zu beobachten war. Während die ESB-Proben einseitig nahe des Mittelpunktes versagten, konnte bei den Karton-Probekörpern ein symmetrisches Reißen und eine Verdrehung des mittleren Bereiches beobachtet werden. Da das Versagen nicht wie erwartet am schlanksten Punkt eintrat wurde im bei der Ermittlung der Schubspannung von einer idealisierten Schnittfläche von $13 \times 18 \text{ mm} = 234 \text{ mm}^2$ ausgegangen. So ergibt sich unter Berücksichtigung der zuvor identifizierten Mittelwerte für die maximalen Schubfestigkeiten eine Mittlere Schubspannung von $3,15 \text{ N/mm}^2$ für ESB, beziehungsweise $5,35 \text{ N/mm}^2$ für die Karton-Verbundplatte.



ABB. B 25: Schadensbild an Karton (links) und ESB (rechts)

5.1.2.4 Versuch 3 - Materialprüfung auf Druckfestigkeit

Der Versuchsaufbau des Druckversuchs bestand aus gleichseitigen Würfeln aus Wellpappe mit einem Kantenmaß von $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$, welche zwischen zwei Druckplatten belastet wurden. Es wurden zehn Probekörper hergestellt, von denen je fünf mit stehender und fünf mit liegender Welle getestet wurden. Gemessen wurde die aufgewendete Kraft in N und der zurückgelegte Weg in mm. Leider stellten sich die Ergebnisse des ersten stehenden Würfels aufgrund eines Sensorfehlers im Nachhinein als nicht verwertbar heraus, weshalb im Vergleich nur neun Datenreihen zur Verfügung standen.

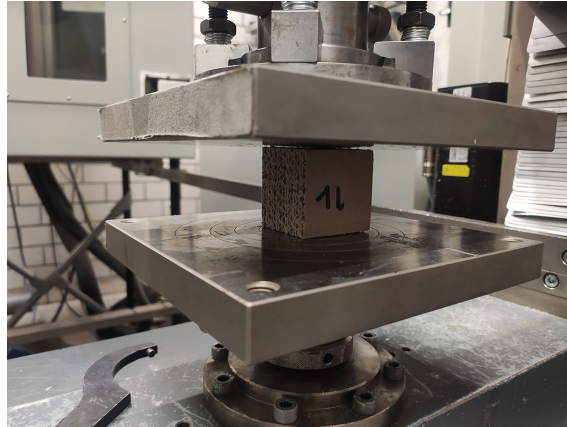


ABB. B 26: Versuchsaufbau Druckversuch

Die Probekörper mit stehenden Lamellen widerstanden einer Kraft zwischen 2.865 und 3.061 N bei einem Mittelwert von 2964 N. In liegender Ausrichtung ergaben sich Werte zwischen 513 und 901 N und einem Mittelwert von 756 N. In Anbetracht der Fläche von $50 \times 50 \text{ mm} = 2.500 \text{ mm}^2$ ergeben sich so mittlere maximale Druckspannungen von stehend $1,19 \text{ N/mm}^2$ und liegend $0,30 \text{ N/mm}^2$. Hieraus ergibt sich unter Druckbelastung eine um den Faktor 3,4 höherer Grenzspannung für stehend orientierte Wellpappe gegenüber der liegenden Ausrichtung.

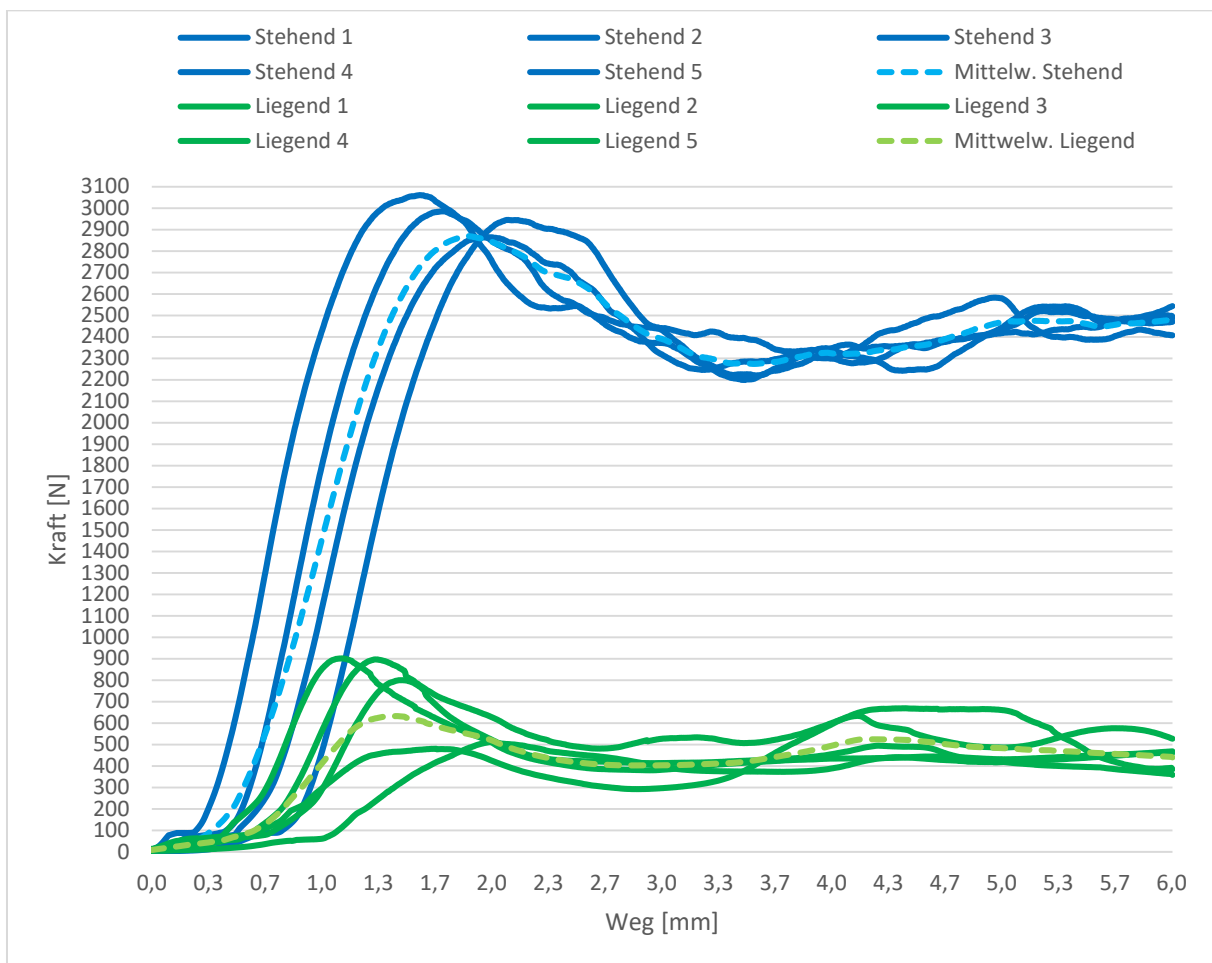


ABB. B 27: Last-Verformungskurve Druckversuch

Im Diagramm wird deutlich, dass unabhängig von der Ausrichtung bereits nach ein bis zwei mm zurückgelegtem Weg die Höchstwerte überschritten wurden. Darauf folgend tritt bei beiden Testreihen ein Wellenförmiges Muster ein, welches mit den Versagensbildern korreliert. Unter Druckbelastung kommt es, besonders zu einer Ziehharmonika-artigen Verformung der Probekörper welches durch das Einfalten der dünnen Papierlagen in die Hohlräume entsteht. Dies beginnt an den Kontaktflächen mit dem Prüfstand und breitet sich von beiden Seiten in Richtung der Mitte aus.

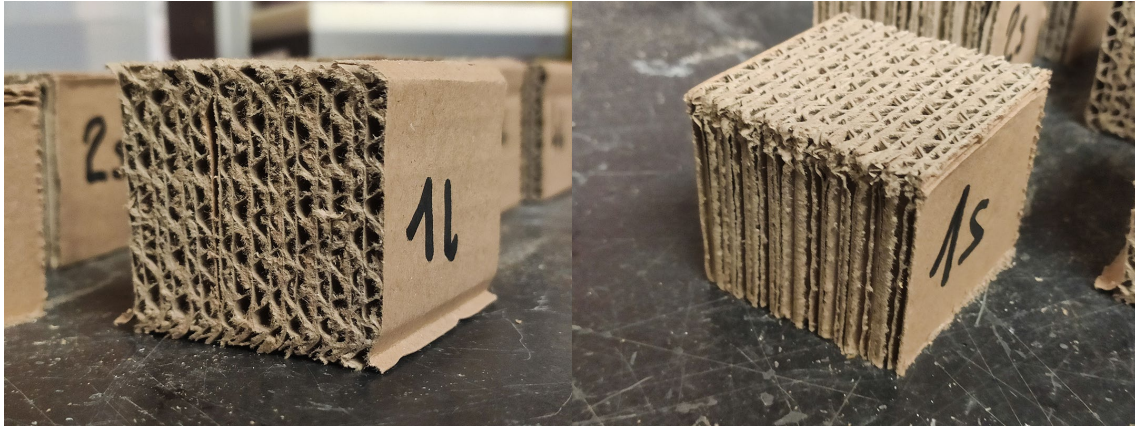


ABB. B 28: Schadensbild liegende Welle (links) und stehende Welle (rechts)

5.1.2.5 Fazit Statik

In den Versuchen 1 und 2 konnte im Hinblick auf ihre Stabilität die Konkurrenzfähigkeit der Karton-Verbundplatte mit der konventionell eingesetzten ESB-Platte nachgewiesen werden. Die Bauteilversuche (1) konnten ohne ein Versagen der Beplankung abgeschlossen werden, da zuerst die Befestigungsmittel nachgaben. Im Materialversuch auf Scherfestigkeit konnte die Karton-Verbundplatte eine im Mittelwert um 69% höhere Schubfestigkeit als ihr Pendant erreichen.

Auch die in Versuch 3 untersuchte Druckfestigkeit der Wellpappe zeigte deutliche Unterschiede in Abhängigkeit ihrer Orientierung zur Krafteinwirkung. Bei ihrer Verwendung als Gefachdämmung besteht die Möglichkeit diese zu einem statischen Einsatz zu bringen, indem sie Schubkräfte im Gesamtsystem verteilt. Auf diese Weise könnte es möglich sein, das Ständerwerk schlanker auszuführen und so Material einzusparen.

5.2 Bauklimatische Prüfung (IBEA)

5.2.1 Physikalische Werte von Papier

5.2.1.1 Tabellarische Annäherung

Um die in Abschnitt 3.2.2 formulierten Fragen zu beantworten sind mindestens folgende physikalischen Werte von Papier notwendig:

- Rohdichte ρ [kg/m³]
- Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
- Wasserdampfdiffusionswiderstand μ [-]
- Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, stehen weder für Wellpappe noch für Vollpappe vollständige Datensätze zur Verfügung. Da die benötigten Werte im Rahmen des Forschungsprojektes nicht ermittelt werden können, werden über zwei Abstraktionsschritte (tabellarischer Vergleich und Errechnen von max. und min. Werten) Näherungswerte erarbeitet. Diese Näherungswerte dienen als Grundlage für die bauphysikalische sowie die bauklimatische Einstufung der Wandkonstruktionen aus Papier.

In einem ersten Schritt der Abstraktion werden die Werte von Bach (vgl. Bach, 2020) tabellarisch erfasst und mit vergleichbaren (Holz-) Baustoffen abgeglichen.

Material	Quelle	Rohdichte ρ in [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ in [W/(m K)]	Wasserdampf- diffusionswiderstand μ [-]	Spez. Wärmekapazität c_{spez} kJ/(m ² K)
Vollpappe Altpapier	1	472	0,072	-	
Vollpappe Holzstoff	1	458	0,071	-	
Wellpappe	1	131	0,052	-	
Vollpappe Zellstoff verdichtet	1	778	-	96 - 106	
Vollpappe Zellstoff unverdichtet	1	757	-	51 - 54	
Altpapier Ponal- Beschichtet	1	764	-	103 - 157	
Altpapier PVA- Beschichtet	1	764	-	1080 - 133	
Wellpappe standart	1	-	-	15	
Wellpappe PVA- Beschichtet	1	-	-	23	
Holz Fichte	4	468	-	128/25	
PVAc	4	1125	-	4071/243	
Holz Fichte mit PVAc	4	513		208/33	
Zellulose	3	160	0,040	1/2	2,1
Holzfaserplatte 01	3	250	0,050	5	2,1
Holzfaserplatte 02	3	160	0,044	5/3	2,1
Vollholz Fichte	3	450	0,13	20/50	1,6
Esb P5	3	621	0,12	80/40	2,0
Dreischichtplatte Fichte	3	470	0,13	220/70	1,6

Tab. A 14: Bauphysikalische Werte Papierwerkstoffe [BKH20] [Uba23] [VKJ12]

Beim Wasserdampfdiffusionswiderstand stellte sich die Herausforderung, dass Bach augenscheinlich zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit und des Wasserdampfdiffusionswiderstand nicht die gleiche Pappe verwendete. Dies wurde anhand der angegebenen Rohdichte vermutet. Auch wurde zwar ein

Dry- und ein Wet-Cup Verfahren durchgeführt. Jedoch lieferten laut Bach nur die Wet-Cup Versuche reproduzierbare und so belastbare Ergebnisse [BKH20]. Um den Einfluss von Klebstoffen auf den Wasserdampfdurchgangskoeffizienten besser einschätzen zu können, wurde eine Testreihe von Volkmer et al. „Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen“ herangezogen [VJK12]. Bei dem Experiment wird der Einfluss von verschiedenen Klebstoffen bei Holzwerkstoffen untersucht. Dabei wird als Testmaterial ein Fichtenfurnier (2mm verwendet). Da die Rohdichte von Vollpappe und Fichte vergleichbar hoch ist, dienten uns diese Untersuchungen als Orientierungs- und Vergleichswerte. Volkmer et al. verweisen darauf, dass dies daran liegen kann, dass der Klebstoff (1) in das Material eindringt und (2) gegebenenfalls Risse entstehen können [VJK12]. Bei der Betrachtung des Sommerlichen Wärmeschutz ist vor allem die thermische Masse von Interesse. Dabei sind vor allem zwei Werte von Bedeutung: Die Rohdichte (ρ , [kg/m³]) und die spezifische Wärmekapazität ($c_{\text{spez.}}$, [kJ/(m² K)]). Da die Rohdichte auch einen direkten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat, wurden hierzu ebenfalls die Werte von Bach herangezogen. Die spezifische Wärmekapazität war als Stoffeigenschaft so nicht zu finden. Da Papierwerkstoffe aus Holzfasern (Faserstoff) hergestellt sind, und die spez. Wärmekapazität von Holzwerkstoffen sich zwischen 1,2 kJ/(m² K) und 2,1 kJ/(m² K) bewegen, wurde hier ebenfalls ein Mittelwert angenommen.

Ausgehend von der tabellarischen Auswertung und unter Berücksichtigung der eben erwähnten Zusammenhänge werden für die ersten Berechnungen (vgl. Abschnitt 4.2.2) die Werte für Wellpappe und Vollpappe abgeleitet und die Werte für die Karton Verbundplatte (KVP_00) errechnet:

Material	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	W.dampfdurchgangs- Koeffizient	Spez. Wärmekapazität
	ρ in [kg/m ³]	λ in [W/(mK)]	μ [-]	c_{spez} kJ/(m ² K)
Wellpappe	131	0,051	15	1200
Wellpappe/ Weißleim	181	0,051	23	1200
Vollpappe	472	0,072	39	1200
Vollpappe/ Weißleim	522	0,072	103	1200
KVP_00	257	0,055	34	1200

Tab. A 15: Abstraktion eins, physikalische Werte (Wellpappe, Vollpappe, KVP)

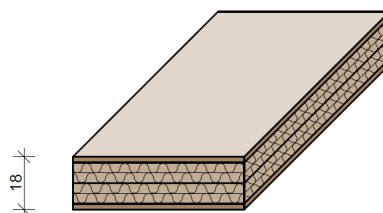


Abb. A 22: Karton Verbundplatte (KVP_00)

5.2.1.2 Bandbreite bauphysikalischer Kenngrößen

Da der Fokus der Untersuchungen nicht auf den materialspezifischen Eigenschaften von Papier sondern der bauklimatischen Eigenschaften von Wandaufbaute aus Papierbaustoffen liegt, werden für die bauklimatische Simulation (vgl. Abschnitt 5.2.2) maximale Werte, minimale Werte und gemittelte Werte erarbeitet. Dies hat zum Ziel, das Spektrum aufzuzeigen, in welchem sich Papierbaustoffe bewegen können. Ausgehend von der in Abschnitt 5.2.1.1 aufgestellten Tabelle wurden in einem zweiten Abstraktionsschritt folgende Werte für die abstrakten Baustoffe Wellpappe_max und Wellpappe_min sowie und Vollpappe_max und Vollpappe_min.

Material	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	W.dampfdurchgangs- Koeffizient	Spez. Wärmekapazität
	ρ	λ	μ	c
	in [kg/m ³]	in [W/(mK)]	[-]	in [J/(kgK)]
Wellpappe_max	250	0,060	21	2,1
Wellpappe_min	130	0,045	3	1,2
Vollpappe_max	700	0,100	100	2,1
Vollpappe_min	400	0,070	10	1,2

Tab. A 16: Physikalische Werte, abstrakte Baustoffe Vollpappe und Wellpappe

Ausgehend von diesen abstrakten Werten wurden auch Werte für die in Abschnitt 4.2.3 konzipierten KVP_I01 (bestehend aus 5x2mm Vollpappe, Vollflächig verklebt mit Weißleim) und KVP_A01 (bestehend aus 4x7mm Wellpappe und einer Deckschicht aus Vollpappe, punktuell verklebt mit Weißleim) errechnet:

Material	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	W.dampfdurchgangs- Koeffizient	Spez. Wärmekapazität
	ρ	λ	μ	c
	in [kg/m ³]	in [W/(mK)]	[-]	in [J/(kgK)]
KVP_I01max	700	0,100	100	2,1
KVP_I01min	400	0,070	10	1,2
KVP_A01max	280	0,062	26	2,1
KVP_A01min	148	0,046	3	1,2

Tab. A 17: Physikalische Werte, abstrakte Baustoffe KVP_I01 und KVP_A01

Diese abstrakten maximalen und minimalen Werte von Papier zeigen das ungefähre Spektrum auf, in welchem sich Papierbaustoffe bewegen könnten.

5.2.1.3 Sensitivitätsanalyse und Mittelwert

Die minimal und maximal Werte von Vollpappe, Wellpappe und der KVP_A01 und KVP_I01 werden gemittelt, um die fiktiven Baustoffe Wellpappe_gemittelt, Vollpappe_gemittelt, KVP_A01_gemittelt und KVP_I01_gemittelt abzuleiten. Um die bauklimatischen Performance der fiktiven Baustoffe einzuordnen und zu prüfen, wie sensibel das Innenraumklima darauf reagiert, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die dafür verwendete Simulationsumgebung ist die gleiche die auch für die spätere Simulation des sommerlichen Wärmeschutzes verwendet wurde und ist in Abschnitt 3.2.3.3 ausführlich beschrieben.

Material	Rohdichte ρ in [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit λ in [W/(mK)]	W.dampfdurchgangs- Koeffizient μ [-]	Spez. Wärmekapazität c in [J/(kgK)]
Wellpappe_max	250	0,060	21	2,1
Wellpappe_gemittelt	190	0,053	12	1,65
Wellpappe_min	130	0,045	3	1,2
Vollpappe_max	700	0,100	100	2,1
Vollpappe_gemittelt	550	0,085	55	1,65
Vollpapp_min	400	0,070	10	1,2
KVP_I01max	700	0,100	100	2,1
KVP_I01	550	0,085	55	1,65
KVP_I01min	400	0,070	10	1,2
KVP_A01max	280	0,062	26	2,1
KVP_A01	214	0,054	15	1,65
KVP_A01min	148	0,046	3	1,2

Tab. A 18: Maximal, durchschnitts und minimal Werte, Wellpappe, Vollpappe, KVP

Auswertung:

Papier_gemittelt	Max. operative Innenraumtemperatur beträgt 29,5°C (max. Außenraumtemp = 31,4 °C) Es fallen 509h >26 °C an, was 5,8 % der Jahresstunden entspricht. Dabei werden 541 Übertemperaturgradstunden erreicht.
Papier_min	Die max. op. Innenraumtemperatur ist gegenüber Papier_gemittelt um 0,3K gestiegen (29,8°C). Es fallen 40h >26°C mehr an (549), was 6,3% der Stunden in einem Jahr entspricht. Dabei entstehen 113 Übertemperaturgradstunden mehr (654)
Papier_max	Die max. op. Innenraumtemperatur ist gegenüber Papier_gemittelt um 0,2 K gesunken (29,2 °C). Die Stunden >26 °C haben sich um 34h auf 475 h reduziert, was 5,4% Stunden in einem Jahr entspricht. Dabei entstehen 61 Übertemperaturgradstunden weniger (480).

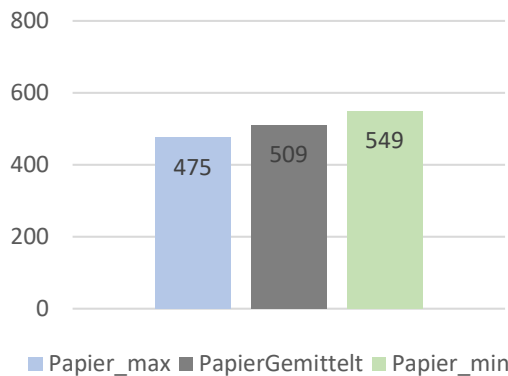


Abb. A 23: Stunden >26 °C, Papier_max, Papier_min, Papier_gemittelt

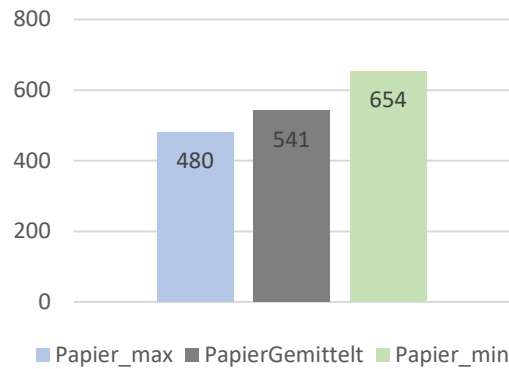


Abb. A 24: Übertemperaturgradstunden, Papier_max, Papier_min, Papier_gemittelt

Fazit:

Die abgeleiteten fiktiven Baustoffe (KVP_I01 und KVP_A01) ordnen sich zwischen den maximal und minimal Varianten ein. Die performance von Papier_max und Papier_min wirken sich nicht Übermäßig auf die Performance der Konstruktion aus. Folglich Für die Simulation des sommerlichen Wärmeschutzes (vgl. Abschnitt 5.2.2) werden die Baustoffe KVP_I01 und KVP_A01 verwendet. Es ist festzuhalten, dass die Werte von KVP_I01 und KVP_A01 Näherungswerte darstellen und keine geprüften Materialeigenschaften sind.

5.2.2 Sommerlicher Wärmeschutz

5.2.2.1 Ziel und Methodik

Mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen mit WUFI plus sollen qualitative Aussagen betreffend dem sommerlichen Wärmeschutz gemacht werden. Betreffend Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität bewegen sich Papierwerkstoffe mutmaßlich zwischen Holzbaustoffen und mineralischen Baustoffen. Durch die Simulation eines Standartraumes mit WUFI plus soll dieses Potenzial überprüft und verifiziert werden. Für die bauklimatische Betrachtung werden hierfür verschiedene Fassadenaufbauten unter den gleichen Nutzungs,- und Klimarandbedingungen simuliert. Die Umgebungsbedingungen und der Versuchsaufbau sind in Abschnitt 3.2.3 erläutert. Um zu einer qualitativen Aussage betreffend des sommerlichen Wärmeschutz zu kommen, wurden sechs Versuchsreihen konzipiert. Für die Simulation des Papierwandaufbaus P00_00_00_00 wurden die in Abschnitt 5.2.1 hergeleiteten Werte Wellpappe_Gemittelt und Vollpappe_Gemittelt verwendet. Folgende Versuchsreihen werden durchgeführt:

Versuchsreihe 01 – Referenzvergleich

Versuchsreihe 02 – Variation Kern

Versuchsreihe 03 – Variation Innere Beplankung

Versuchsreihe 04 – Variation Innere Beplankung plus Putz

Versuchsreihe 05 – Variation Äußere Beplankung

Versuchsreihe 06 – Optimierter Wandaufbau aus Papier

Versuchsreihe 07 – Papier-Hybridbausweise

Die Versuchsreihe 01 dient dazu, den Papierwandaufbau P00_00_00_00 mit den in Abschnitt 4.2.2 eingeführten Referenz Wandaufbauten L00_00_00_00 (konventioneller Leichtbau) und M00_00_00_00 (konventioneller Massivbau) zu vergleichen und qualitativ zu bewerten. In den Versuchsreihen 02 bis 05 wird jeweils eine Schicht des Papierwandaufbaus variiert und wiederum mit konventionellen Baustoffen verglichen. In der Versuchsreihe 06 und 07 werden die Erkenntnisse aus den fünf Versuchsreihen angewendet und ein optimierten Papierwandaufbau (P12_00_01_00) sowie ein Papierhybridbau (P15_00_01_06) vorgeschlagen und untersucht. Bauphysikalische Aspekte werden bei den Versuchsreihen 02 bis 05 nicht berücksichtigt und nur bei Versuchsreihe 01 und 06 betrachtet.

Die Versuchsreihen folgen der in Abschnitt 4.2.3 erarbeiteten Positionen 1.1 bis 3.1.

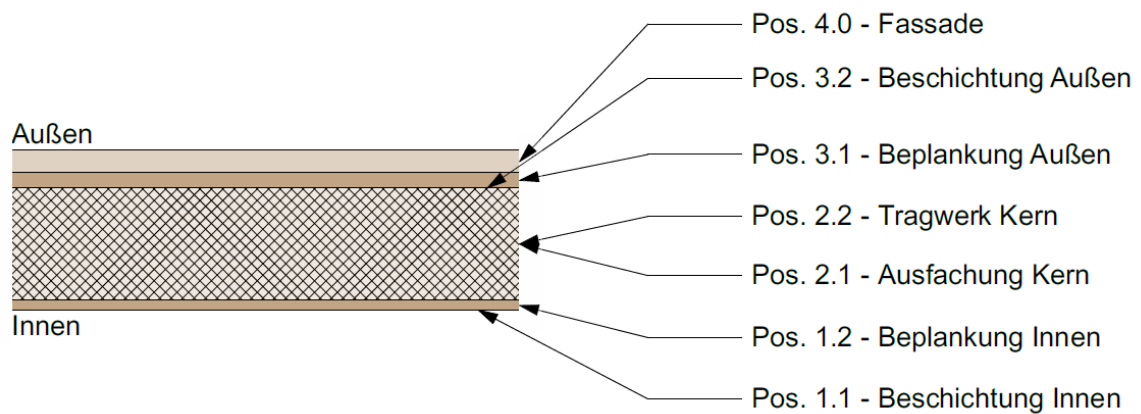
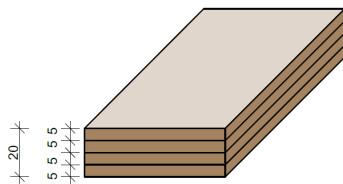


Abb. A 25: Schichten Konzept Papierwandaufbau

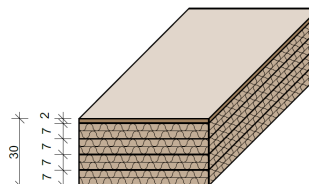
KVP_I01

$\rho = 550 \text{ kg/m}^3$
 $c_{\text{spez}} = 1,65 \text{ kJ/(kg K)}$
 $\mu = 55$
 $\lambda = 0,085 \text{ [W/(mK)]}$



KVP_A01

$\rho = 214 \text{ kg/m}^3$
 $c_{\text{spez}} = 1,65 \text{ kJ/(kg K)}$
 $\mu = 15$
 $\lambda = 0,054 \text{ [W/(mK)]}$



Tab. A 19: KVP_I01 und KVP_A01

5.2.2.2 Versuchsreihe 01 - Referenzvergleich

Das Ziel ist die Einordnung der Performance des entwickelten Papierwandaufbaus P00_00_00_00 im Vergleich mit einer konventionellen Leichtbauweise L00_00_00_00 und einer konventionellen Massivbauweise M00_00_00_00 unter Berücksichtigung der folgenden Eigenschaften:

Bezeichnung	P00_00_00_00	L00_00_00_00	M00_00_00_00
Beschreibung	Papierwandaufbau	Konventioneller Leichtbau	Konventioneller Massivbau
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 180mm Zellulosedämmung 2x20mm KT_I01	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 20mm Holzfasserdämmplatte 200mm Mineralwolle 15mm OSB 3 Platte 12,5mm Gipskartonplatte	5mm Kalkzementputz 160mm Holzfasserdämmung 240mm Kalksandstein 10mm Gipsputz

Tab. A 20: Versuchsreihe 01: Übersicht Wandaufbauvarianten

Auswertung:

P00_00_00_00	Max. operative Innenraumtemp. 29,5°C. Es fallen 509h >26°C an, was 5,8% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 541 Übertemperaturstunden.
L00_00_00_00	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber P00_00_00_00 0,2K erhöht (29,7°C). Die Stunden >26°C haben sich um 25h auf 534h erhöht, was 6,1% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 61 Übertemperaturstunden mehr (602).
M00_00_00_00	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,7K gesunken (28,7°C). Die Stunden >26°C haben sich um 105h auf 404h reduziert, was 4,6% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 184 Übertemperaturstunden weniger (357)

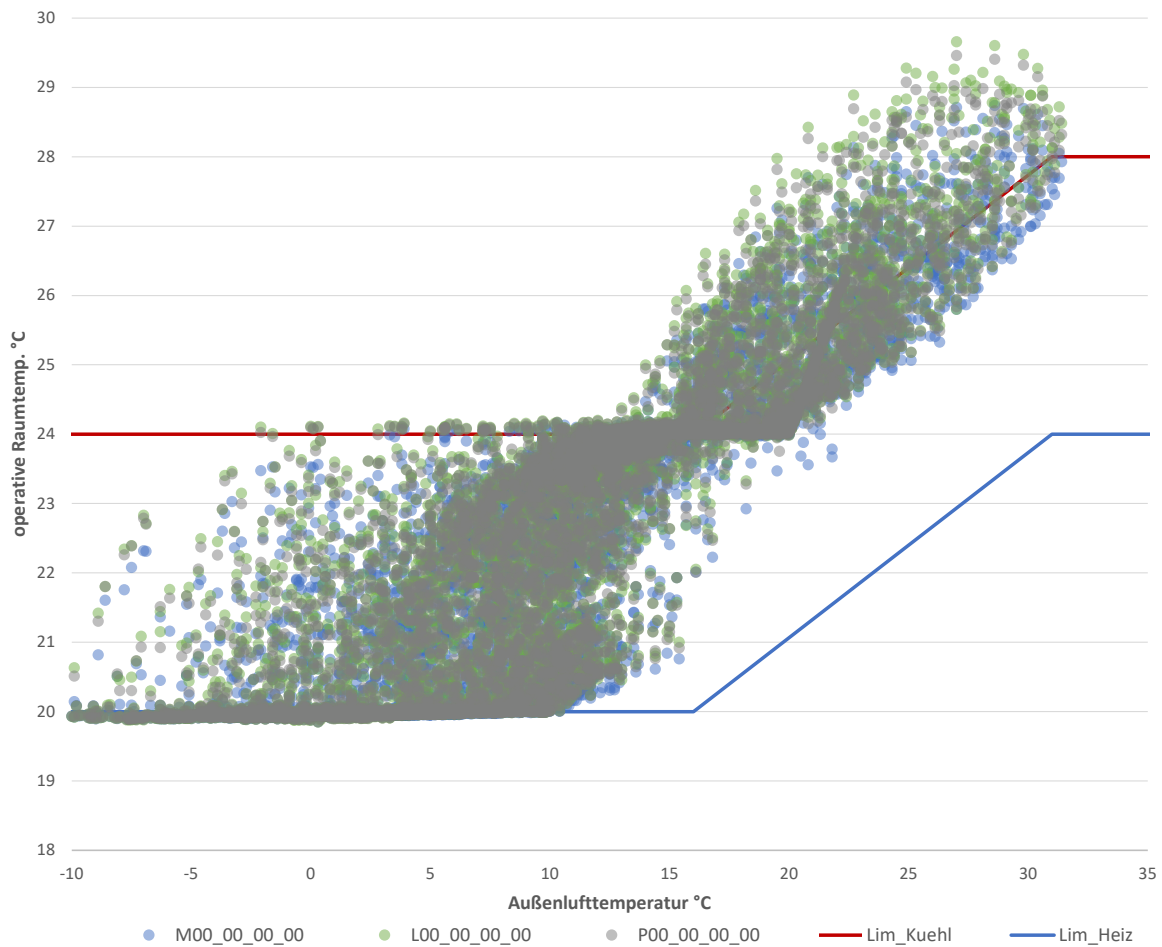


Abb. A 26: Versuchsreihe 01, Verteilung der stündlichen op. Raumtemp. Gegenüber der Außenlufttemp.

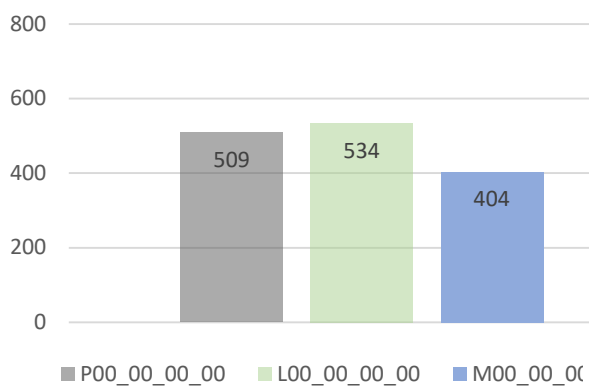


Abb. A 27: Versuchsreihe 01: Anzahl Stunden >26°C

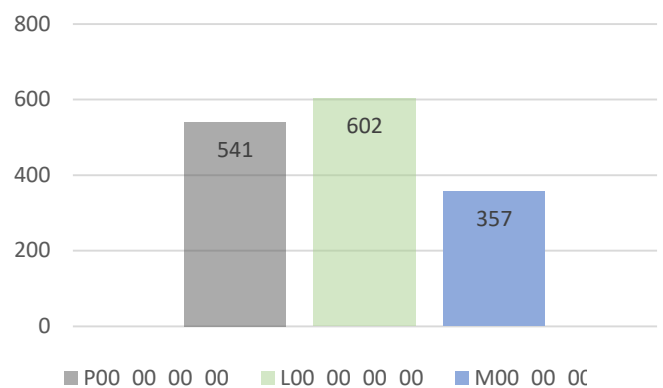


Abb. A 28: Versuchsreihe 01: Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Die Performance von P00_00_00_00 kann zwischen der von M00_00_00_00 und der von L00_00_00_00 eingeordnet werden. Wobei sich P00_00_00_00 eher im Bereich von L00_00_00_00 bewegt. Aufgrund der Konstruktionsweise von P00_00_00_00 ist es naheliegend, dass sich die Performance auch in dem Bereich von L00_00_00_00 bewegt. Dies kann bestätigt werden. Es zeigt

sich jedoch auch, dass P00_00_00_00 das Potenzial aufzeigt, sich gegebenenfalls in Richtung der Performance von M00_00_00_00 zu schieben.

5.2.2.3 Versuchsreihe 02 – Kern (Pos. 2.1)

Wellpappe hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Zellulosedämmung. Insofern ist es naheliegend, Zellulosedämmung als Dämmstoff im Kern zu verwenden. Gemeinsam mit der bauklimatischen Betrachtung steht die Frage im Raum inwieweit Wellpappe zusätzlich zur Aufgabe des Wärmeschutzes einen Beitrag zur Aussteifung leistet. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob die erhöhte thermische Masse den sommerlichen Wärmeschutz verbessert.

Auswertung:

P01_00_01_00	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,1K gesunken (29,4°C). Die Stunden >26°C haben sich um 9h auf 500h reduziert, was -0,1% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 15 Übertemperaturstunden weniger (526).
P02_00_02_00	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,1K gesunken (29,4°C). Die Stunden >26°C haben sich um 3h auf 506h reduziert, was -0,1% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 12 Übertemperaturstunden weniger (529).

Bezeichnung	P01_00_01_00	P02_00_02_00
Beschreibung	Pos. 2.1 durch Wellpappe ersetzt. Die Stärke des Kerns wird aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von 180mm auf 220mm erhöht	Der Kern wird zur Hälfte durch Wellpappe ersetzt. Die Stärke des Kerns wird aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von 180mm auf 200mm erhöht
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 220mm Wellpappe 2x20mm KT_I01	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 100mm Zellulosedämmung 100mm Wellpappe 2x20mm KT_I01

Tab. A 21: Versuchsreihe 02: Übersicht Wandaufbauvarianten

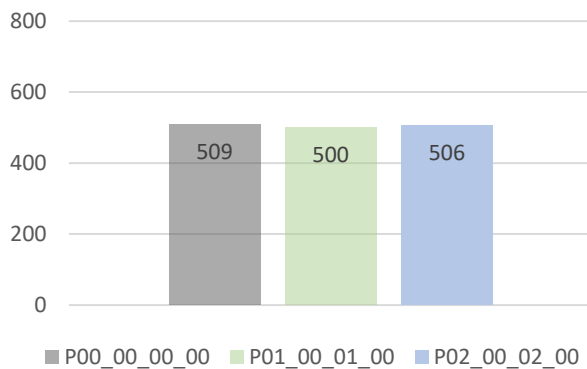


Abb. A 29: Versuchsreihe 02: Anzahl Stunden >26°C

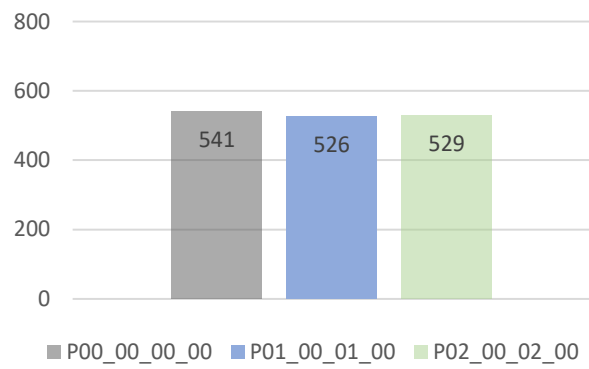


Abb. A 30: Versuchsreihe 02: Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Die Performance verbessert sich in einem nicht relevanten Ausmaß. Bei beiden Varianten. Betreffend dem sommerlichen Wärmeschutz kann folglich Zellulose oder Wellpappe gleichermaßen eingesetzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die bessere Wärmeleitfähigkeit von Wellpappe zu einem geringfügig dickeren Bauteil führt.

5.2.2.4 Versuchsreihe 03 – Innere Schicht Beplankung (Pos. 1.2)

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss der inneren Schicht der Raum zugewandten Seite zu untersuchen und mit der Performance von konventionellen Produkten vergleichen.

Bezeichnung	P03_00_00_01	P05_00_00_03
Beschreibung	Die Pos. 1.2 wird durch eine OSB Platte (2x20mm) ersetzt.	Die Pos. 1.2 wird durch eine Lehmbauplatte (2x20mm) ersetzt.
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 180mm Zellulosedämmung 2x 20mm OSB 3 Platte	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 180mm Zellulosedämmung 2x20mm Lehmbauplatte

Tab. A 22: Versuchsreihe 03: Übersicht Wandaufbauvarianten

Der Wandaufbau P04_00_00_00 mit einer Dreischichtplatte auf Pos. 1.2 wird aufgrund der Vergleichbarkeit und Aussagekraft hier nicht berücksichtigt.

Auswertung:

P03_00_00_00	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,1K gesunken (29,4°C). Die Stunden >26°C haben sich um 10h auf 499h reduziert, was 5,7% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 21 Übertemperaturstunden weniger (520).
P05_00_00_00	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,1K gesunken (29,4°C). Die Stunden >26°C haben sich um 5h auf 504h reduziert, was 5,8% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 15 Übertemperaturstunden weniger (526).

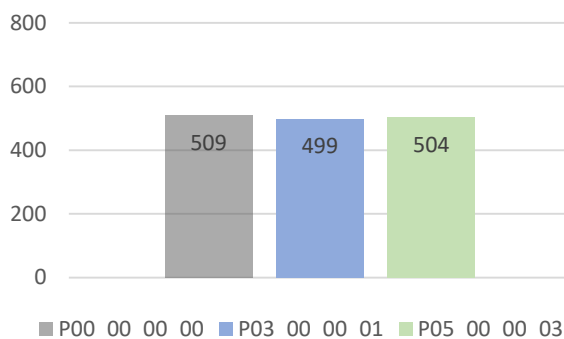


Abb. A 31: Versuchsreihe 03: Anzahl Stunden >26°C

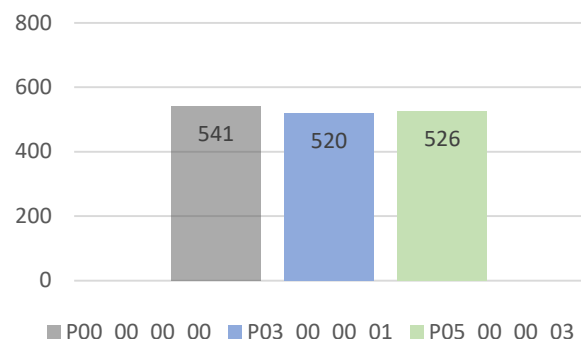


Abb. A 32: Versuchsreihe 03: Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Obwohl die Rohdichte von Lehm weitaus höher ist als die von OSB oder der KVP_I01, bringt die Lehmplatte keine Besserung hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes mit sich. Dies ist vor allem auf die höhere spez. Wärmekapazität von KVP_I01 und OSB zurück zu führen.

	Lehmplatte	OSB Platte	KVP_I01
Rohdichte [kg/m ³]	700	600	550
Spez. Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]	1,0	1,7	1,65

Tab. A 23: Rohdichte und spez. Wärmekapazität, Lehmplatte, OSB Platte, KVP_I01

5.2.2.5 Versuchsreihe 04 – Innere Schicht Putz

Ziel: Wie die Versuchsreihe 03 gezeigt hat, beeinflusst die Pos. 1.2 die Performance des Wandaufbaus nicht maßgeblich. Alternativ zum Auswechseln der Pos. 1.2 kann auch eine zusätzliche Putzschicht aufgebracht werden. Dies erhöht die thermische Masse. Die Versuchsreihe 04 untersucht, wie groß der Einfluss dieser zusätzlichen Schicht ist.

	P00_00_00_00	P08_00_00_06
Beschreibung	Papierwandaufbau	Ausgehend von P00_00_00_00 wird zusätzlich 20mm Lehmputz als Pos. 1.1 aufgetragen
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 180mm Zellulosedämmung 2x20mm KT_I01	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 180mm Zellulosedämmung 2x20mm KT_I01 20mm Lehmputz

Tab. A 24: Versuchsreihe 04: Übersicht Wandaufbauvarianten

Auswertung:

P08_00_00_06 Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,3K gesunken (29,2°C). Die Stunden >26°C haben sich um 41h auf 468h reduziert, was 5,3% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 73 Übertemperaturstunden weniger (468).

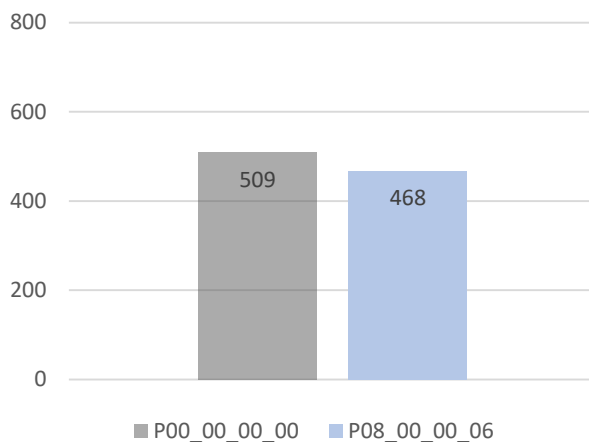


Abb. A 33: Versuchsreihe 04: Anzahl Stunden >26 °C

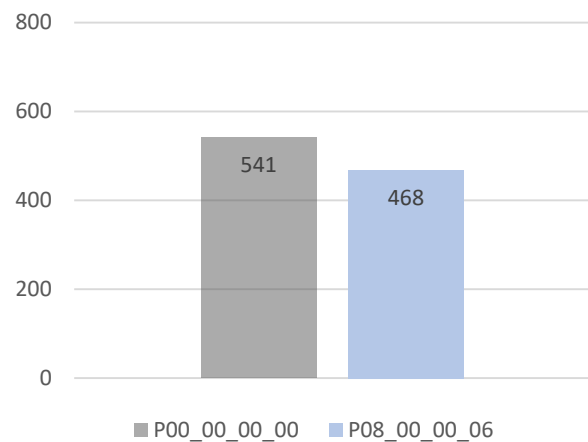


Abb. A 34: Versuchsreihe 04: Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Die zusätzlichen 20mm Lehmputz verbessern die Performance. Durch den Lehmputz werden die Übertemperaturgradstunden von 541 Kh auf 468 Kh gesenkt.

5.2.2.6 Versuchsreihe 05 – Äußere Schicht Beplankung (Pos. 3.1)

Das Ziel dieser Versuchsreihe ist es den Einfluss der außenliegenden Schicht (Pos. 3.1) zu überprüfen und mit der Performance von konventionellen Produkten vergleichen.

	P10_01_00_00	P11_02_00_00
Beschreibung	Die Pos. 3.1 wird durch eine Holzfaserdämmplatte (30mm) ersetzt.	Die Pos. 3.1 wird durch eine ESB P5 (15mm) ersetzt.
Detail	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm Holzfaserdämmplatte 180mm Zellulosedämmung 2x20mm KT_I01	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 15mm ESB P5 180mm Zellulosedämmung 2x20mm KT_I01

Tab. A 25: Versuchsreihe 05: Übersicht Wandaufbauvarianten

Auswertung:

P10_01_00_00	Die max. op. Innenraumtemp. bleibt gegenüber dem P00_00_00_00 unverändert (29,5°C). Die Stunden >26°C haben sich um 1h auf 510h angestiegen, was 5,8% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 6 Übertemperaturstunden mehr (547).
P11_02_00_00	Die max. op. Innenraumtemp. bleibt gegenüber dem P00_00_00_00 unverändert (29,5°C). Die Stunden >26°C haben sich um 4h auf 505h reduziert, was 5,8% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 1 Übertemperaturstunden mehr (542).

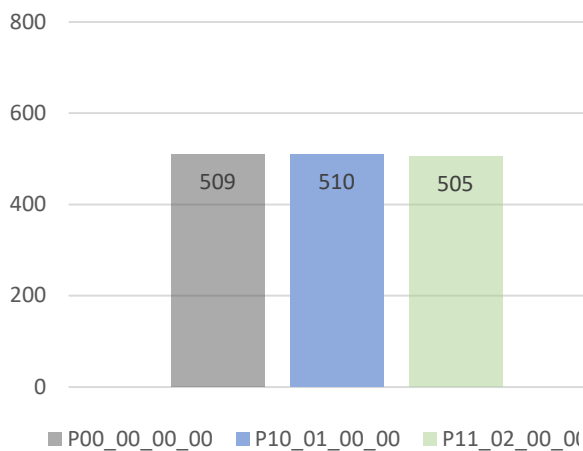


Abb. A 35: Versuchsreihe 05: Anzahl Stunden >26°C

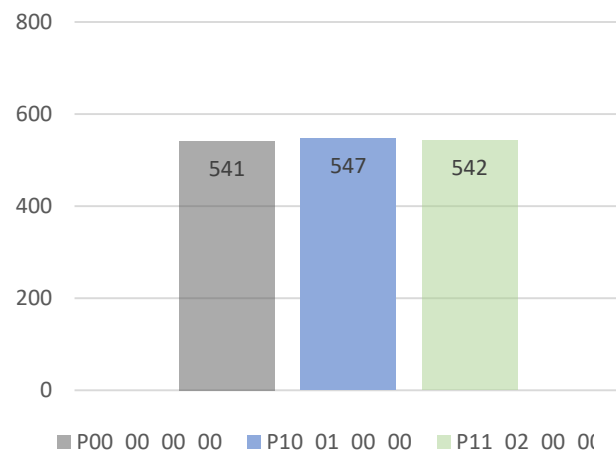


Abb. A 36: Versuchsreihe 05: Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Die Äußere Bepankung (Pos. 3.1) als Karton Verbundplatte (KVP_A01) performt identisch wie eine Holzfaserdämmplatte oder eine ESB P5 Platte.

5.2.2.7 Versuchsreihe 06 – Optimierter Wandaufbau aus Papier

Ziel: Aufgrund der Versuchsreihen 01 bis 05 wird der Papierwandaufbau P00_00_00_00 optimiert. In Versuchsreihe 02 hat sich gezeigt, dass der Kern aus Wellpappe die beste Performance hat. Die

Versuchsreihe 03 zeigen, die KVP_I01 im Vergleich zu einer OSB Platte oder Lehmbauplatte gleichwertig performt. Die Versuchsreihe 05 zeigt, dass die KVP_A01 im Vergleich zu Holzfaserdämmung oder ESP gleichwertig performt. Folglich setzt sich der optimierte Wandaufbau aus diesen Schichten zum Papierwandaufbau zusammen (P12_00_01_00).

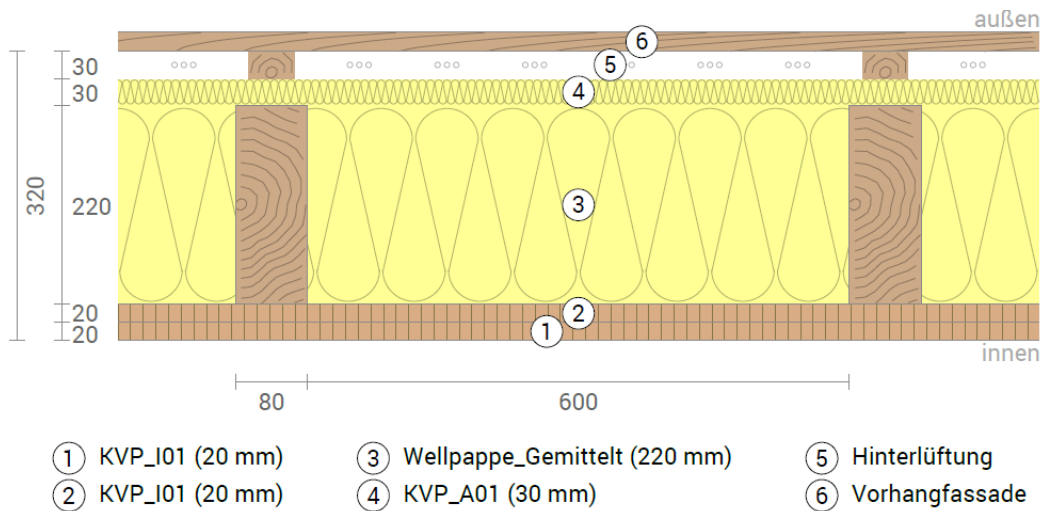


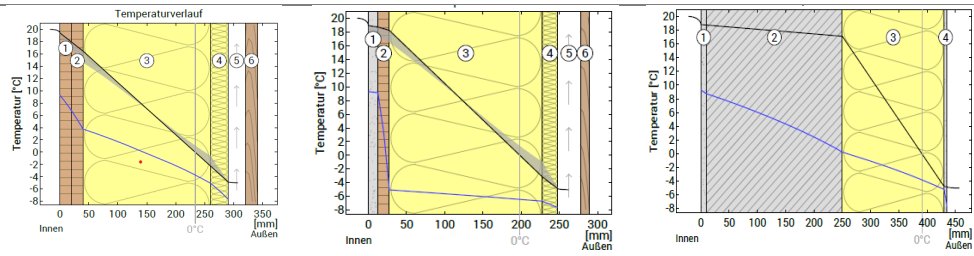
Abb. A 37: P13_00_01_00, Wandaufbau Papier Optimiert (Zeichnung: www.ubakus.de)

Die Versuchsreihe 06 beinhaltet den Versuch 06a – Referenzvergleich um die Performance von P12_00_01_00 mit den Referenzaufbauten L_00_00_00_00 und M00_00_00_00 zu vergleichen. Im Versuch 06b – Sensitivitätsanalyse wird eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Es werden die bauphysikalischen Werte von Papier als optimal (P13_00_01_00opti) und suboptimal (P14_00_01_00subopti) simuliert.

Versuch 06a

	P12_00_01_00	L00_00_00_00	M00_00_00_00
Beschreibung	Pos. 2.1 durch Wellpappe ersetzt. Die Stärke des Kerns wird aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von 180mm auf 220mm erhöht.	Referenz konventioneller Leichtbau	Referenz Konventioneller Massivbau
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 220mm Wellpappe_gemittelt 2x20mm KT_I01		

Detail



Dicke	34,1	28,9	43,5
U-Wert	0,20	0,20	0,19
Wärmekapazität gesamt [kJ/m² K]	98	54	401
Gewicht flächenspez. [kg/ m²]	76	42	379

Tab. A 26: Versuchsreihe 6a: Übersicht Wandaufbauvarianten (Zeichnung: www.ubakus.de)

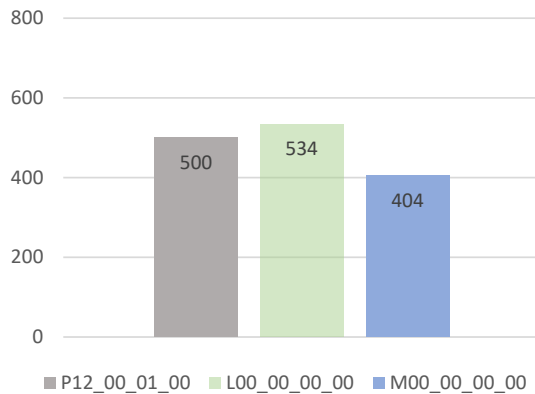


Abb. A 38: Versuchsreihe 06a: Anzahl Stunden >26°C

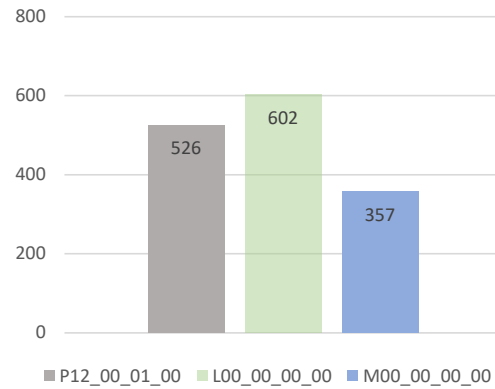


Abb. A 39: Versuchsreihe 06a: Übertemperaturgradstunden

Auswertung:

Innenraumtemperatur	Die max. op. Innenraumtemp beträgt bei P12_00_01_00 29,4°C ist somit um 0,7K höher als beim M00_00_00_00 aber um 0,3K tiefer als beim L00_00_00_00.
Stunden >26°C	Es fallen 500 Stunden >26°C an und somit 96 mehr als bei M00_00_00_00 jedoch 34 weniger als bei L00_00_00_00.
Übertemperaturgradstunden	Es fallen 526 Übertemperaturstunde an und somit 169 mehr als bei M00_00_00_00 jedoch 76 weniger als bei L00_00_00_00.

Fazit:

Der Optimierte Papierwandaufbau P12_00_01_00 performt betreffend dem sommerlichen Wärmeschutz etwas besser als der Leichtbau L00_00_00_00 jedoch deutlich weniger gut als der Massivbau M00_00_00_00.

Versuch 06b –Sensitivitätsanalyse

Um das Spektrum der physikalischen Werte von Papier, welche im Abschnitt 3.2 hergeleitet wurden abzudecken, wird P12_00_01_00 als optimale Variante (P13_00_01_00_opti) und als suboptimal Variante (P14_00_01_00_subopti) untersucht. Dabei werden die physikalischen maximalen und minimalen Werte so eingesetzt, dass es der jeweiligen Aufgabe der Pos. 1.2, 2.1 und 3.1 jeweils am dienlichsten ist.

	P12_00_01_00	P13_00_01_00opti	P14_00_01_00subopti
Beschreibung	Pos. 2.1 durch Wellpappe ersetzt. Die Stärke des Kerns wird aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit von 180mm auf 220mm erhöht. Pos. 1.1 zusätzlich 20mm Lehmputz.	Die physikalischen Werte für die Papierwerkstoffe werden für den jeweiligen Einsatzbereich als „optimal“ angenommen. Für Pos. 3.1 wurde KVP_A_01min, Pos. 2.1 Wellpappe_min, Pos. 1.2 KVP_I01_max	Die physikalischen Werte für die Papierwerkstoffe werden für den jeweiligen Einsatzbereich als „suboptimal“ angenommen. Für Pos. 3.1 wurde KVP_A_01max, Pos. 2.1 Wellpappe_max, Pos. 1.2 KVP_I01_min
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 220mm Wellpappe 2x20mm KT_I01	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01_max 220mm Wellpappe_min 2x20mm KT_I01_min	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01_min 220mm Wellpappe_max 2x20mm KT_I01_max
U-Wert in [W/(m ² K)]	0,2	0,19	0,22
Wärmekapazität in [kJ/m ² K]	98	113	157
Gewicht pro m² in [kg/ m ²]	76	79	94

Tab. A 27: Versuchsreihe 06b: Übersicht Wandaufbauvarianten

Auswertung:

P12_00_01_00	Max. operative Innenraumtemp. 29,4°C. Es fallen 500h >26°C an, was 5,7% der Jahresstunden entspricht. Dabei entstehen 526 Übertemperaturstunden.
P14_00_01_00_subopti	Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 gleich geblieben (29,4°C). Die Stunden >26°C um 4h auf 504h was

P13_00_01_00_opti

unverändert 5,7% der Stunden im Jahr entspricht. Dabei entstehen jedoch 24 Übertemperaturstunden mehr (551).

Die max. op. Innenraumtemp. ist gegenüber dem P00_00_00_00 um 0,1K gesunken (29,3°C). Die Stunden >26°C haben sich um 10h auf 490h reduziert, was -0,1% der Stunden im Jahr entspricht. Dabei entstehen 24 Übertemperaturstunden weniger (501).

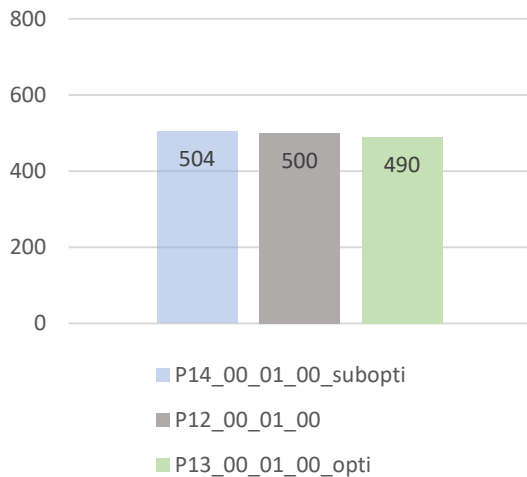


Abb. A 40: Versuchsreihe 06b: Anzahl Stunden >26°C

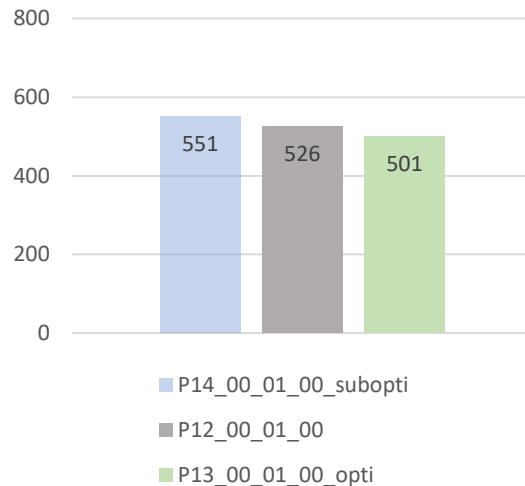


Abb. A 41: Versuchsreihe 06b:
Übertemperaturgradstunden

Fazit:

Eine optimale oder suboptimale Annahme der physikalischen Werte von Papier verändert den sommerlichen Wärmeschutz nicht maßgebend. Jedoch würde sich der U-Wert der Konstruktion bei P14_00_01_00subopti auf 0,22 W/(m²K) und bei P13_00_01_00opti reduziert er sich auf 0,19 W/(m²K). Der Grund dafür ist, dass die Rohdichte bei Wellpappe_max zunimmt und die Wärmeleitfähigkeit dadurch abnimmt. Die führt auch dazu, dass das sich das Gewicht der Konstruktion erhöht und so auch die Wärmekapazität zunimmt.

5.2.2.8 Versuchsreihe 07 – Papier-Hybridbauweise

Aus der Versuchsreihe 04 geht hervor, dass eine zusätzliche Putzschicht im Innenraum (Pos. 1.1) weiter verbessert. Die Versuchsreihe 07 untersucht, inwiefern sich die Performance des Wandaufbaus Papier Optimiert (P12_00_01_00) durch eine zusätzliche Putzschicht aus 20mm Lehm (P15_00_01_06) weiter verbessert und sich dadurch der Performance des Massivbaus (M00_00_00_00) annähern kann.

	P15_00_01_06	L00_00_00_00	M00_00_00_00
Beschreibung	Ausgehend vpn P12_00_01_00 wir keine zusätzliche Putzschicht als Pos. 1.1 eingeführt	Referenz konventioneller Leichtbau	Referenz Konventioneller Massivbau
Wandaufbau	12mm Fassadenbekleidung 30mm Hinterlüftung 30mm KT_A01 220mm Wellpappe 2x20mm KT_I01 20mm Lehmputz		
Dicke in [cm]	36,1	28,9	43,5
U-Wert in [W/(m2K)]	0,20	0,20	0,19
Wärmekapazität in [kJ/m³ K]	132	54	401
Gewicht pro m2 in [kg/ m²]	110	42	379

Tab. A 28: Versuchsreihe 7: Übersicht Wandaufbauvarianten

Auswertung

Innenraumtemperatur	Die max. op. Innenraumtemp beträgt bei P12_00_01_06 29,1°C ist somit um 0,4K höher als beim M00_00_00_00 aber um 0,5K tiefer als beim L00_00_00_00.
Stunden >26°C	Es fallen 469 Stunden >26°C an und somit 65 mehr als bei M00_00_00_00 jedoch 65 weniger als bei L00_00_00_00.
Übertemperaturgradstunden	Es fallen 459 Übertemperaturstunde an und somit 102 mehr als bei M00_00_00_00 jedoch 143 weniger als bei L00_00_00_00.

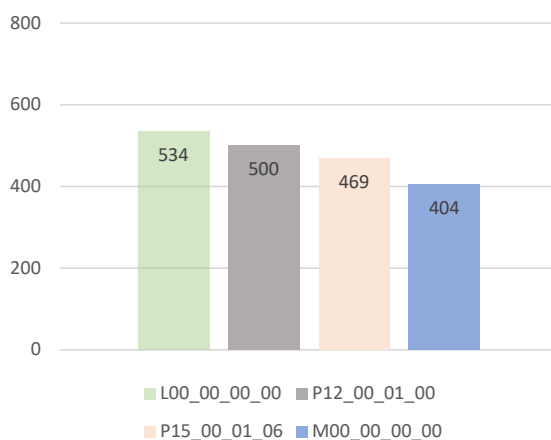


Abb. A 42: Versuchsreihe 07, Anzahl Stunden >26°C

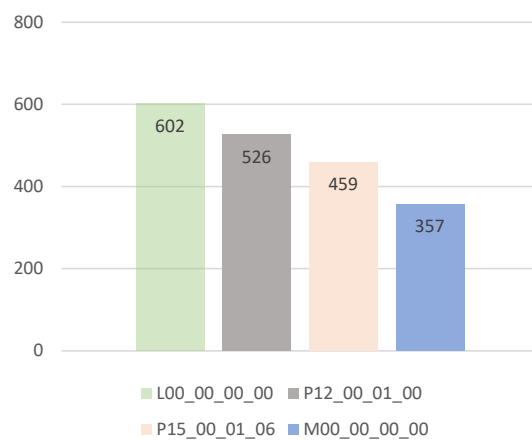


Abb. A 43: Versuchsreihe 07, Übertemperaturgradstunden

Fazit

Ergänzt um eine zusätzliche innenliegende Putzschicht (20mm Lehmputz) kann der hybride Papierwandaufbau (P15_00_01_06) zwischen dem Referenz Leichtbau und dem Referenz Massivbau verortet werden. Durch den Einsatz von Wellpappe als Dämmung erhöht sich das Flächengewicht im Vergleich zum Leichtbau stark und damit auch die Wärmekapazität. Dies ist jedoch auch darauf zurückzuführen, dass durch die erhöhte Wärmeleitfähigkeit von Wellpappe gegenüber Mineralwolle die Dämmstärke um 40mm erhöht wurde. Der Massivbau performt jedoch deutlich besser als der Papierhybridbau. Dabei ist der Massivbau auch nochmals um 74mm stärker. Was ich ebenfalls positiv auf die Wärmekapazität auswirkt.

5.2.3 Experimentelle raumklimatische Untersuchung

Die Verwendung eines neuartigen Baustoffes wie Papier und dem Ziel die Auswirkungen auf das Innenraumklima zu bewerten steht vor zahlreichen Herausforderungen. Eine Lösung die Auswirkungen zu bewerten stellt dabei die Untersuchung in einer Klimakammer dar. Im Zuge des Projektes wurde eine Klimakammer dahingehend weiterentwickelt, um Tests in einem kleinen gebauten Maßstab und kurzen Messzeiträumen zu ermöglichen. Dies erfolgt vor dem Hintergrund mit diesen Messreihen direkt Aussagen zu Baustoffen und Konstruktionsweisen zu ermöglichen wie auch diese Ergebnisse mit Simulationen abzugleichen und diese Modelle zu verifizieren. Nicht nur bei der Betrachtung von Papier sondern bei der Entwicklung von Baustoffen mit noch unbekanntem physikalischen Eigenschaften oder äußerst heterogenen Konstruktionsweisen ist dieser Ansatz äußerst sinnvoll.

Für die Untersuchungen in der Klimakammer wird eine Testbox entwickelt, mit Hilfe der ein kompletten Bauteilaufbauten einem standardisierten Prüfverfahren unterzogen werden. Die Testbox befindet sich als adiabater Raum innerhalb einer Klimakammer. Über einen regelbaren Zuluftventilator wird über das Klima in der Klimakammer exakt das Klima in der Testbox gesteuert. Innerhalb der Testbox befindet sich ein Prüfling, welcher mit der Raumluft der Testbox in Verbindung steht. Daraus wird die Wirkung des Prüflings auf die Raumklimabedingungen untersucht.

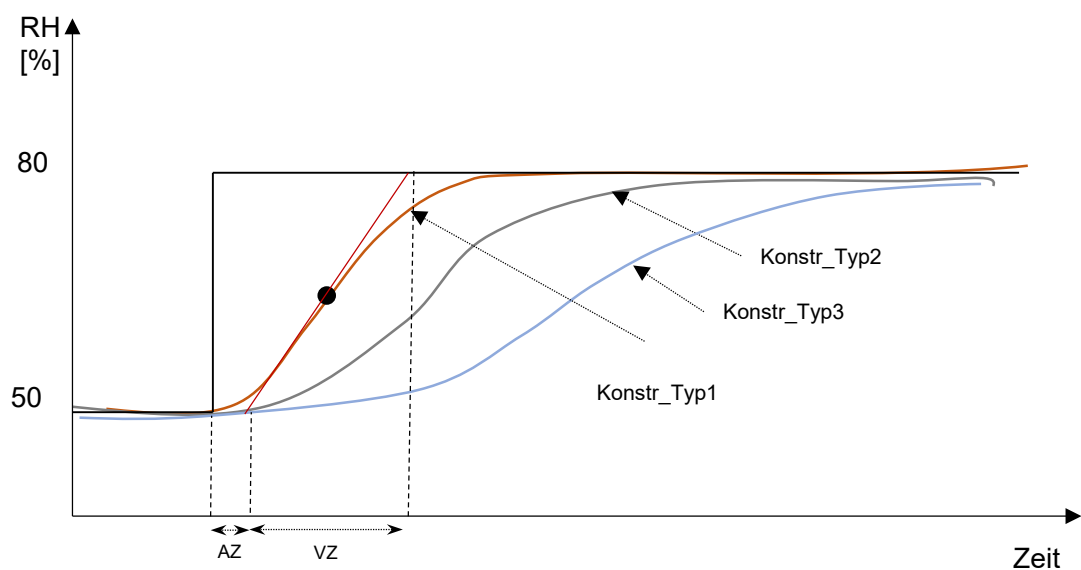
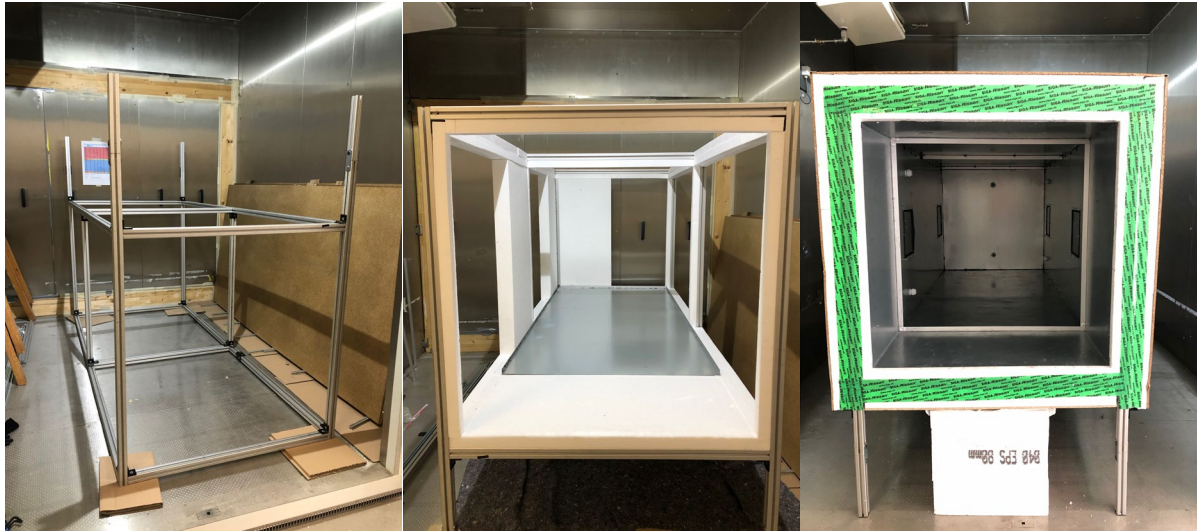


Abb. A 44: Schematische Sprungantworten von drei Konstruktionsvarianten

Die Theorie des in diesem Zuge entwickelten Ansatzes ist eine Testbox die einen zu bewertenden Prüfling als Wandaufbau enthält. Die Testbox innerhalb der Klimakammer fungiert als Innenraum und weist die Proportionen eines standardisierten Raums auf. die wesentlichen Einflussgrößen auf die Raumklimatik können über die Klimakammer und einen regelbaren Luftwechsel in die Testbox exakt gesteuert werden. Unter der sprungartigen Veränderung einzelner (externer) Einflussgrößen, wie Temperatur- und Feuchteveränderungen und die Luftwechselrate wird das Raumklima als Antwort auf diese Sprünge bewertet (). Aus dieser Sprungantwort lassen sich viele Metriken ableiten. Ein einfacher statischer Ansatz stellt die Ermittlung des sogenannte Moisture Buffering Value (MBV) dar [RPM05]. Dabei wird die Feuchtigkeitsaustausch bei einer konstanten Temperatur von 23 °C unter einem Sprung der relativen Feuchte von 8 Stunden bei 75 % zu weiteren 16 Stunden bei 33 % untersucht. Das dynamische Verhalten lässt sich darüber hinaus anhand der Wendetangente aus Ausgleichszeit (AZ) und Verzugszeit ablesen. Anhand des Quotienten von AZ/VZ lässt sich, klassischerweise aus der Regelungstechnik abgeleitet, die Regelbarkeit und damit die Dynamik ermitteln.

Aufbau Klimakammer



- Feuerverzinktes Stahlblech

- EPS - Dämmung

- Aluminiumrahmen

- Holzverkleidung



Abb. A 45: Aufbau der Testbox innerhalb der Klimakammer (Fotos: Lilli Böhm)

Die Klimakammer einschließlich Testbox wurde bis zur Funktionsfähigkeit mit ersten Prüflingen vorbereitet, sodass in der zu diesem Projekt folgenden Phase 2 konkreten Konstruktionen untersucht werden können.

5.3 Kreislaufeignung (RB)

5.3.1 Karton Verbundplatte:

Für die weitere Entwicklung stellte sich die Frage, ob für Plattenwerkstoffe eine Alternative aus Papierwerkstoffen denkbar ist. Dafür wurde eine Kombination aus Well- und Vollpappe konzipiert, die die sogenannte Karton Verbundplatte bildet. Da diese Platte auch eine aussteifende Funktion hat, war eine Verbindung der Papierschichten ohne vollflächige Verklebung nicht möglich. Die ersten Varianten hatten Wellpappe als Kern und wurden mit Vollpappen beschichtet. Zwei Platten wurden vorbereitet – mit paralleler und orthogonaler Wellenausrichtung der Wellpappe im Kern.



Abb. C 20: Karton Verbundplatte 1 u. 2

Beide sind auf einer Testrahmen 1x1 Meter befestigt und seitlich belastet und qualitativ eingeschätzt war die orthogonale Ausrichtung stabiler im Vergleich. Ein Nebenergebnis vom Test war die Feststellung, dass die Klebeverbindung Vollpappe – Wellpappe stärker als die Wellpappe – Wellpappe war, was zum Einfügen von einer Vollpappe Schicht im Kern geführt hat. Als Folge war die neue optimierte Variante 5-schichtig mit orthogonaler Ausrichtung der Wellpappe.

Diese Plattenaufbau wurde als nächstes getestet und bei seitlicher Belastung war die Karton Verbundplatte an sich intakt, aber im Peripheriebereich an den Schraubenstellen sind Schaden oder große Spielräume entstanden. Als Folge der Belastung und die geringere Oberfläche Festigkeit sind die Schrauben in der Platte gesunken und die Verbindungen waren lose. Nach der Evaluation des Schadens wurde festgestellt, dass die Höhe des Schraubenkopfs mehrfach größer als die Dicke der Vollpappe war und das Papierwerkstoff nicht ausreichender Widerstand gewährleisten konnte. So war das Ziel das Sinken der Schrauben durch die Vollpappe in der Wellpappeschicht, wo die Festigkeit sehr gering ist, zu vermeiden. Als Resultat wurden 3 Vollpappeschichten an der Außenseite gestapelt, die im Endeffekt die erforderliche Festigkeit für Verschraubung gewährleisten haben.

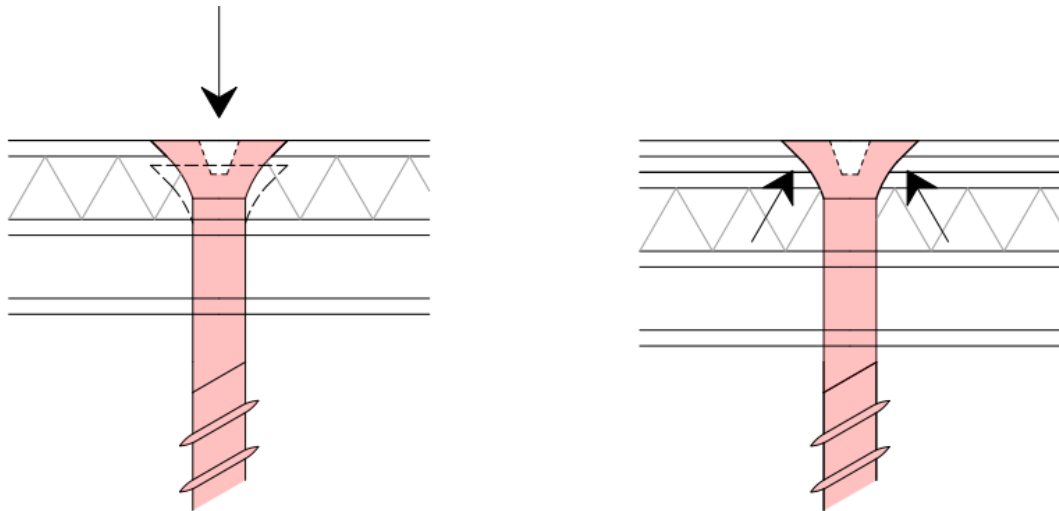


Abb. C 21: Karton Verbundplatte 3 u. 4 (Verschraubung)

Die Karton Verbundplatte wurde experimentell nur beim Prototyp 5 eingesetzt, aber da es geringe Unterschiede bei der Steifigkeit und Befestigung gibt, könnten bei allen Mock-Ups die Außen- und Innenplatten durch Karton Verbundplatte ersetzt werden. Aus ökobilanzieller Sicht ist es erstrebenswert alle Platten damit umzusetzen. Aus Tabelle C9 ist deutlich abzulesen, dass die Karton Verbundplatte bezogen auf Gewicht, Primärenergie und Treibhauspotential besser als die OSB-Platte ist. Mit ihrem Einsatz wird die Konstruktion leichter und hat deutlich geringer Umweltwirkung.

Dämmstoff	Stärke	Gewicht	PENRT	GWP
OSB-Platte	19,5 mm	12,7 kg/m ²	48 kWh/m ²	-7 kg/m ²
Karton Verbundplatte	19,5 mm	5,8 kg/m ²	6 kWh/m ²	-12 kg/m ²

Tab. C 9: Vergleich Kartonverbundplatte und OSB-Platte

5.3.2 Klebetests

Um den Einfluss des Bindemittels auf die Konstruktion zu untersuchen, werden in der Folge Testergebnisse von Kleinversuchen vorgestellt. Die erste Untersuchung ist der Klebetest, womit nach einer qualitativen Einschätzung die Haftkraft und die Integrität der später auseinander gelösten Pappen (Integrität der Pappe - IgP) und quantitativ die Menge des verbrauchten Klebstoffs pro Quadratmeter ermittelt werden. Dabei sind folgende Kombinationen von Oberflächen (Porosität immer gegen 50%) und Kleber getestet:

- Weißleim – Wellpappe + Wellpappe
- Weißleim – Vollpappe + Vollpappe
- Dextrin – Wellpappe + Wellpappe
- Dextrin – Vollpappe + Vollpappe

Für den Versuchsaufbau wurden Pappen mit Dimensionen (25 cm x 25 cm) bei einer Raumtemperatur von +20°C und niedriger Raumfeuchtigkeit verklebt und 12 Stunden trocken gelassen. Bei der Auftragung von dem Klebstoff wurden, wie unten gezeigt, vier verschiedene Muster verwendet:

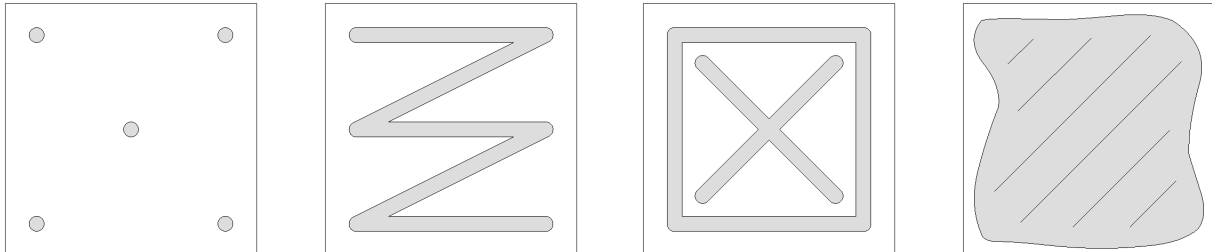


Abb. C 22: Klebemuster

Aus diesem Test ergibt sich, dass Weißleim eine bessere Haftkraft als Dextrinkleber zeigt. Dieser Unterschied resultiert aus der höheren Festigkeit der Klebesubstanz und liegt nicht an der Menge, da bei jedem Klebemuster zwischen Weißleim und Dextrin die gleiche Klebstoffvolumina [ml] aufgetragen wurde und die abzulesenden Differenzen ein Resultat aus der Rohdichte sind. Während der Untersuchung sind auch abhängig vom Muster variierende Klebeschichtdicken in folgender Korrelation festgestellt:

$$T1 > T2/T3 > T4.$$

Dies kann z.B bei der Aufschichtung der Wellpappe Wärmedämmung zu einem additiven Effekt führen, und Abweichungen vom Detailplanung verursachen und muss berücksichtigt werden. Es ist zu beobachten dass -entsprechend der Erwartung- mit Zunahme des verwendeten Klebstoffs die Integrität der später auseinander gelösten Pappen negativ beeinflusst ist.

	T1	T2	T3	T4
Weißleim – Wellpappe + Wellpappe				
Haftkraft	N	H	M	SH
Menge [g/m ²]	25,6	118,4	79,2	150,0
IgP	M	SN	N	SN
Weißleim – Vollpappe + Vollpappe				
Haftkraft	N	H	M	SH
Menge [g/m ²]	25,6	118,4	79,2	150,0
IgP	H	M	M	N
Dextrin – Wellpappe + Wellpappe				
Haftkraft	N	H	M	H

Menge [g/m ²]	23,3	107,8	72,1	136,5
IgP	M	N	M	SN
Dextrin – Vollpappe + Vollpappe				
Haftkraft	SN	H	M	H
Menge [g/m ²]	23,3	107,8	72,1	136,5
IgP	SH	M	H	N

*SH – sehr hoch / H – hoch / M – mittel / N – niedrig / SN – sehr niedrig

IgP Integrität der Pappe

Tab. C 10: Klebemuster/Haftkraft

Da Weißleim wasserfest ist und eine mechanische Bindung nutzt, die nur auf die Oberfläche wirkt, können theoretisch nach der Papierhydratation (Befeuchten von Papierwerkstoff zum Ziel der Materialauflösung) und der mechanischen Zerkleinerung nur Makrostickys bilden. Diese können früh im Bearbeitungsprozess durch Siebssysteme entfernt werden. Allerdings ist das nur bei den punktuellen und streifenartigen Klebemustern gültig, wo die Klebeschichtstärke über 100 µ liegt. Die vollflächige Verleimung kann dünner sein und gleichzeitig stellt ein weiteres Hindernis für das Recycling dar, da sie als untrennbare hydrophobe Schicht wirkt und die dazwischenliegenden Fasern können nicht saturiert und gelöst werden. Als Folge stellt sich die vollflächige Verklebung mit Weißleim wegen der möglichen Bildung von Stickys und der Beeinträchtigung des Recyclingprozesses als ungeeignet dar. Aus diesen Gründen sind bei Weißleim nur T1, T2 und T3 Muster rezyklierfähig.

Dextrin ist komplett wasserlöslich und kann keine Stickys bilden. Beim Papierrecycling und die konsequente Faserverkürzung sind immer Hilfsstoffe erforderlich, damit die anstrebende Produktfestigkeit erreicht werden kann. In der Industrie wird dafür bei Altpapier Stärke benutzt, um die Fasern zu verstärken, und da Dextrin stärkebasierter Klebstoff ist, muss er im Prozess nicht entsorgt werden und wird automatisch einen Bestandteil der Papierbrei. Deshalb ist Dextrinkleber die Recycling-freundlichere Alternative.

Zusammenfassende Tabelle: (alle 6 Mock-Ups) + Konventioneller Referenzaufbau* Beispiel

Kategorie	Maßeinheit	P1	P2	P3	P4	P5	P6	RA*
OSB-Platte	[kg/m ²]	-	23,4	19,5	23,4	11,7	19,5	-
Vollholz		-	8,8	7,2	7,2	4,2	5,2	-
Wellpappe		41,3	45,8	46,3	46,3	-	12,9	-
Vollpappe		-	-	2,7	-	-	-	-
Papprohr		-	-	-	-	-	-	-
Zellulose		-	-	-	-	8,8	6,6	-
KVP*		11,6	-	-	-	5,8	-	-
Putz		-	-	-	-	-	-	19,0
WD		-	-	-	-	-	-	19,8
Beton		-	-	-	-	-	-	576,0
U-wert	[W/m ² K]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
PENRT	[kWh/m ²]	63,0	149	138,0	149,0	57,0	95,0	227,0
Wandstärke	[mm]	314	361	360	361	223	260	440
GWP	[CO ₂ kg/m ²]	-49,0	-75,0	-73,0	-73,0	-39,0	-49,0	+55,0
Gewicht	[kg/m ²]	52,9	78	75,7	76,9	30,5	44,2	614,8
Aufwand	[qual. Einsch.]	hoch	hoch	hoch	niedrig	mittel	mittel	mittel

- Alle Angaben sind für 1 m² Wand ohne Fassade. Die Ökobilanzwerte sind zzgl. Klebstoff.

Tab. C 12: Evaluation Prototypen

5.3.3 Dekonstruktion

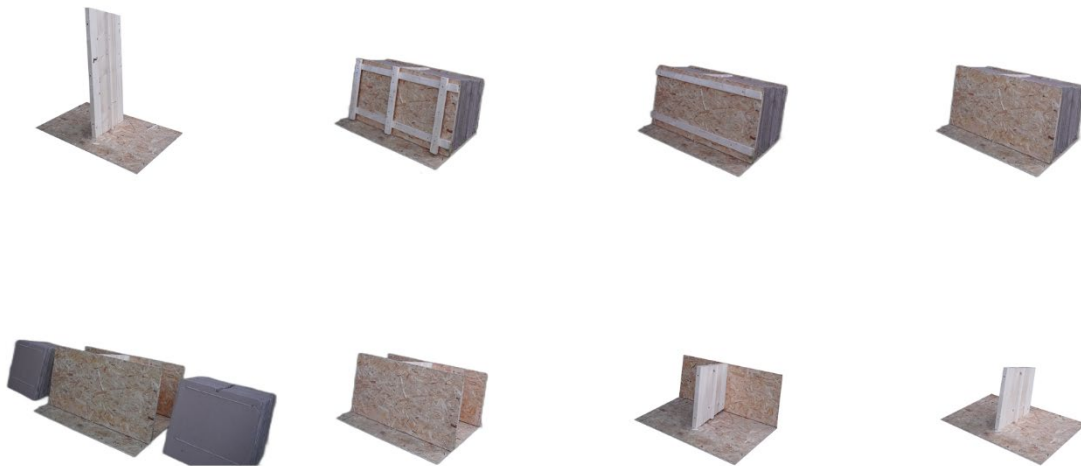
Die Prototypen bestehen aus mehreren Materialien und haben unterschiedliche Konstruktionsarten. Zu jedem Mock-Up ist eine spezifische Dekonstruktionskonzept dargestellt. Das einzige Aspekt, das bei allen gleich ist, ist der Rahmenbau. Weil die Fassaden laut Entwurf dreieckig sind, ergeben sich verschiedene Flächen und somit variieren die Holzbalkenlängen und alle Massivholzteile. Hölzer mit Längen über 2 Meter können für Wiederverwendung separiert werden. Die kürzeren Balken werden zerkleinert und können der stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Für die Dekonstruktionsprüfung standen 5 von den ursprünglich 6 zur Verfügung. Prototyp 1 war fragil und hat beim Transport Schäden genommen, die einer weitere Prüfung entgegenstanden. Die Erkenntnis dabei ist, dass Dekonstruierbarkeit im Spannungsfeld mit den Anforderungen während der Herstellung und der Nutzung steht.

Prototyp 2:

Die Dekonstruktion des Prototyps ist einfach durchzuführen und relativ zerstörungsfrei. Die Befestigung bzw. Verbindungen werden nach wiederholter Verwendung bis zu einem gewissen Grad geschwächt werden. Die Nut- und Federverbindung im Holzrahmen und zwischen dem Holzrahmen und den Wellpappen lässt sich durch Ziehen oder Schieben ohne Werkzeug oder mit Hilfe eines Hammers problemlos lösen. Der durch Kordel verbundene Wellpappenkörper könnte weiterhin als Modul verwendet werden oder die einzelnen Wellpappschichten können durch Lösen der Kordel wieder voneinander gelöst werden. Nach dem Rückbau des Prototyps erhält man nur 4 Materialien: Pappe, Holz, Kordel und Schrauben, die wiedernutzbar und recycelbar sind. Es wird kein zusätzlicher Klebstoff verwendet.

Dekonstruktionsverlauf:



Tab. C 13: Dekonstruktion P2

Kategorie	Maßeinheit	Ergebnis
Verarbeitbarkeit	[qualitative Einschätzung]	leicht
Demontageaufwand	[h (für 1 Person)]	2
Energieverbrauch	[kWh]	0,06
Weiternutzbarkeit/Recycling	[qualitative Einschätzung]	hoch

Abb. C 23: Dekonstruktion P2

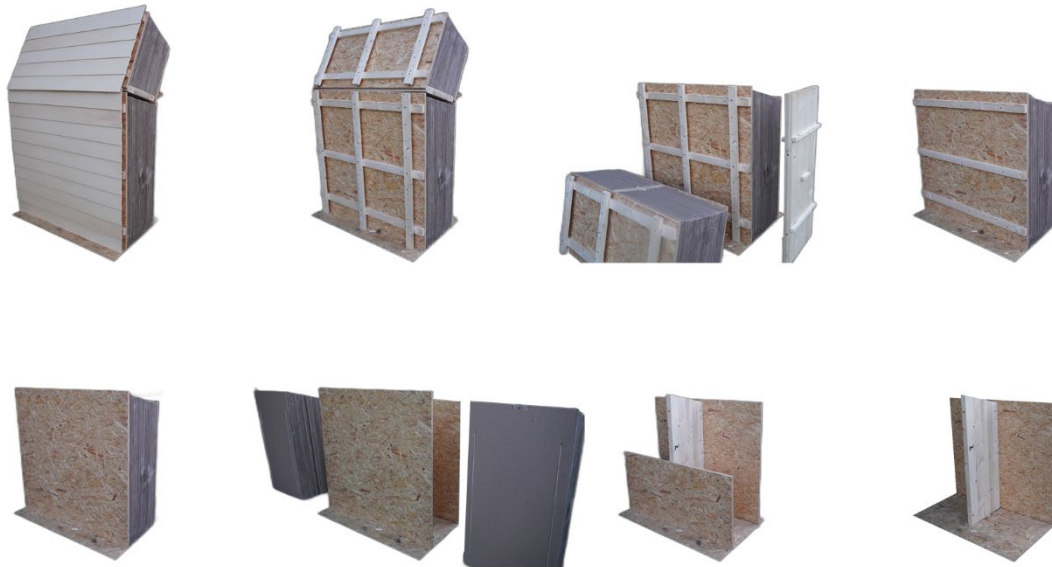


Abb. C 24: Dekonstruktion P2

Prototyp 3:

Dieser Mock-Up wird von außen nach innen dekonstruiert. Die Fassadenbekleidung ist kein Teil dieser Untersuchung und nach ihrer Demontage wird die Außenwandschicht aufgeschraubt, womit Zugang zur Dämmpanelle gewährleistet ist. Da sie nicht befestigt sind, sondern lose reingesteckt, können die Pakete mit geringem Aufwand rausgenommen werden. Nach Entfernung des Kreppbands können die Wellpappen für Recycling und Herstellung vom Papier genutzt werden. Es ist sogar an Wiederverwendung zu denken, denn die Pappen sind unversehrt.

Mit der gelösten Außen- und Dämmschicht, kann auch die innere OSB-Platte demontiert werden und am Ende die Verbindungsplatten und die Querbalken aufgeschraubt und das Tragwerk auseinandergenommen werden.

Kategorie	Maßeinheit	Ergebnis
Verarbeitbarkeit	[qualitative Einschätzung]	mittel
Demontageaufwand	[h (für 1 Person)]	3
Energieverbrauch	[kWh]	0,08
Weiternutzbarkeit/Recycling	[qualitative Einschätzung]	hoch

Tab. C 14: Dekonstruktion P3

Dekonstruktionsverlauf:



Abb. C 25: Dekonstruktion P3

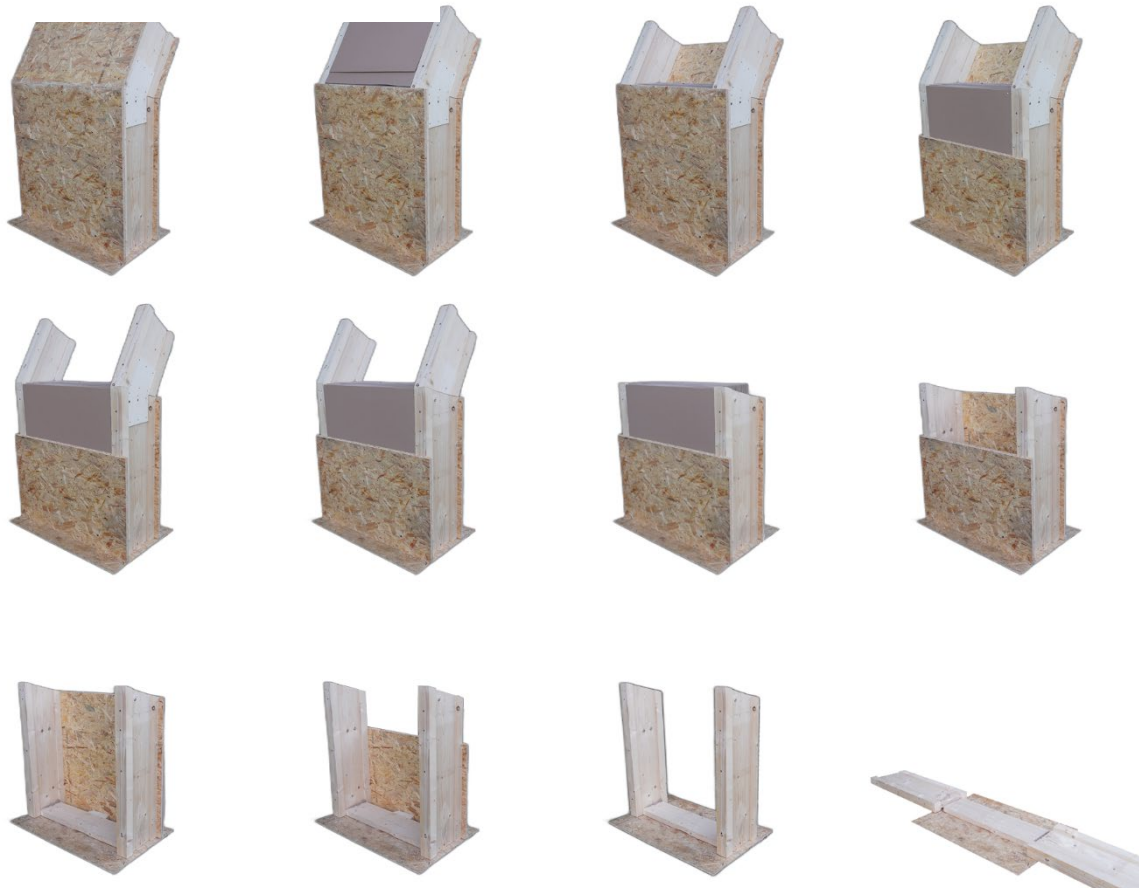


Abb. C 26: Dekonstruktion P3

Prototyp 4:

Prototyp 4 wird von der Außenseite nach Innen rückgebaut. Die OSB-Platten werden abgeschraubt, und wenn der Zugang zu der Dämmpaneel gewährleistet ist, können die verklebten Pappen zusammen rausgenommen werden. In diesem Fall können die dämmenden Segmente wiederverwendet werden. Alternativ können sie auch ohne zusätzlichen Aufwand für dem Recycling zugeführt werden. Da der Stärkekleber wasserlöslich ist, besteht keinen Bedarf die einzelnen Schichten abzutrennen.

Kategorie	Maßeinheit	Ergebnis
Verarbeitbarkeit	[qualitative Einschätzung]	leicht
Demontageaufwand	[h (für 1 Person)]	1
Energieverbrauch	[kWh]	0,04
Weiternutzbarkeit/Recycling	[qualitative Einschätzung]	hoch

Tab. C 15: Dekonstruktion P4

Dekonstruktionsverlauf:



Abb. C 27: Dekonstruktion P4

Prototyp 5:

Anders als bei dem vorigen Prototyp, werden bei der Zellulosedämmung Variante die Außen- und Innenplatten zuerst an der Konstruktion gelassen, damit die lose Dämmung nicht unkontrolliert herausfällt. Das Segment wird in dem Beispiel von oben geöffnet und das Zellulosestoff abgesaugt. Eine andere Möglichkeit, wie im Kapitel 5 beschrieben, ist das Anschließen der Saugmaschine an einer vorgeplanten und eingebauten Düse. Die Zellulose, wenn nicht kontaminiert, kann wieder als Dämmung wiederverwendet werden. Wenn der Zustand des Stoffes nicht optimal ist und Anforderungen für Dämmung nicht entspricht, wird es für die Herstellung von Papierwerkstoffe zum Recycling gebracht werden.

Kategorie	Maßeinheit	Ergebnis
Verarbeitbarkeit	[qualitative Einschätzung]	leicht
Demontageaufwand	[h (für 1 Person)]	1
Energieverbrauch	[kWh]	0,12
Weiternutzbarkeit/Recycling	[qualitative Einschätzung]	hoch

Dekonstruktionsverlauf:



Abb. C 28: Dekonstruktion P5

Prototyp 6:

Der hybride Prototyp wird ähnlich wie Mock-Up 4 und 5 rückgebaut. Das Segment kann von oben geöffnet werden und die Zellulose wird abgesaugt, da keine Düse vorgesehen ist. Nach dem Öffnen können, wenn die Öffnung groß genug ist auch zuerst die Wellpappenpaneele rausholt werden. Sonst bleiben sie zunächst in der Konstruktion liegen, bis das Segment frei von Zellulosestoff ist. Danach können die beiden Platten abgeschraubt und die Wellpappe entsorgt werden. Die relativ dünnen Pappschichten können entweder zusammengeklebt werden, um ein ausreichend dicken Dämmschicht für Wiederverwendung herzustellen, oder für Recycling deponiert werden.

Kategorie	Maßeinheit	Ergebnis
Verarbeitbarkeit	[qualitative Einschätzung]	mittel
Demontageaufwand	[h (für 1 Person)]	1
Energieverbrauch	[kWh]	0,12
Weiternutzbarkeit/Recycling	[qualitative Einschätzung]	hoch

Tab. C 16: Dekonstruktion P6

Dekonstruktionsverlauf:



Abb. C 29: Dekonstruktion P6

5.3.4 Zwischenfazit

Nach der ökobilanziellen Bewertung und der Dekonstruktionsprüfung sich folgendes feststellen:
Bei der Ausbildung des Wandknicks sind die Nut und Feder und die Fügeseite für die Montage einfacher als die kraftschlüssige Verbindung mit verschraubter Platte. Da sie aber in den Prototypen vor allem durch Schwerkraft gesichert sind, ist ihr Widerstand auf horizontale Kräfte gering und aus diesem Grund stellen sie sich als ungeeignet dar.

Nach der Evaluierung der OSB- und Karton Verbundplatten, sind ihre Festigkeit und Steifigkeit ähnlich, aber aus Umweltperspektive, benötigt das Papierprodukt deutlich weniger Herstellungsenergie, hat bessere Treibhauspotentialwerte und ist wesentlich leichter.

In Bezug auf die Dämmschichten zeigen sich beide, Wellpappe und Zellulose, als viel leichter im Vergleich zu einem konventionellen Wandaufbau (ca. 10-fach). Die Wellpappe hat bessere CO₂-Werte und ist einfacher einzubauen. Andererseits ist bei der Zellulose die Energie zur Herstellung weniger und sie ist ein leistungsfähiger Dämmstoff, was in zweimal dünnerem Wandaufbau und konsequenterweise deutlich kleineren Holzmengen resultiert.

Aus den oberen Ergebnissen kann festgestellt werden, dass die optimale Konstruktion mit Karton Verbundplatten verkleidet ist und eine Dämmung entweder Wellpappe für einfachere Montage oder Zellulose für höhere Umweltfreundlichkeit und filigranere Konstruktion eingesetzt wird.

6 Fazit und Handlungsempfehlung

6.1 Konstruktion

Hinsichtlich der Konstruktion wird eine Adaption des Holzständerbaus empfohlen. Diese Bauweise ist sowohl mit im Werk vorgefertigten Bauelementen denkbar, als auch weitestgehend in situ auf der Baustelle. Lediglich der Technikkern mit den Feuchträumen sollte aufgrund der unvorteilhaften Eigenschaften von Papier in Bezug auf seine Feuchtigkeitsaufnahme als Betonfertigteile ausgeführt werden. In Bezug auf die Materialauswahl der Ständerkonstruktion ist, wo immer möglich, Papier zu bevorzugen. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass für jedes (Holz-)Bauteil des klassischen Ständerbaus ein potenzielles Substitut aus Papierwerkstoffen vorhanden ist.

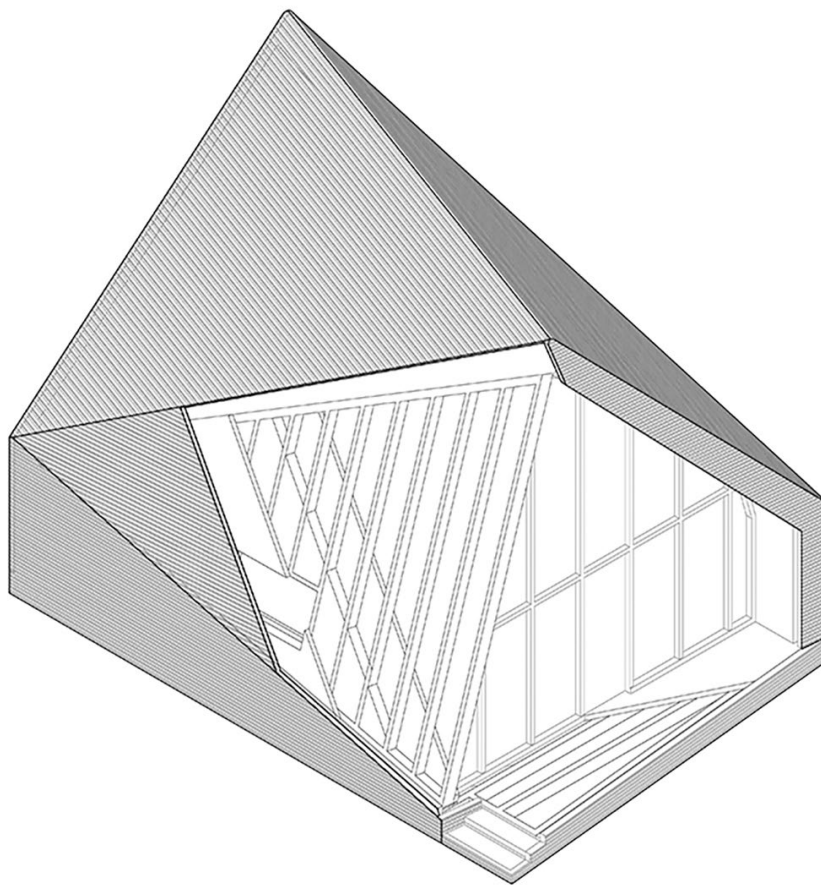


ABB. B 29: Vorgeschlagene Kubatur und Bauweise

Mit Blick auf die, üblicherweise als Holzwerkstoffplatte ausgeführte, beidseitige Bepunktung der Ständerkonstruktion wird die Verwendung einer Karton-Verbundplatte empfohlen. Diese besteht aus mehreren, miteinander verleimten Kartonlagen mit hoher Grammatur. Es wurde gezeigt, dass eine derartige Platte den konventionell verwendeten Holzfaserplatten im Hinblick auf ihre Schubfestigkeit um ca 69% überlegen ist (vgl. Kap 5.1.2.). Ebenso wurde in einem Versuch zur Abschätzung des Brandverhaltens (vgl. Kap 5.1.1.) eine mit Holzwerkstoffplatten vergleichbare Widerstandsdauer gegenüber direkter Beflammung beobachtet. Da keine Testeinrichtungen für einen qualifizierten

Brandversuch gemäß DIN 4102 [Deu98] zur Verfügung standen, wird jedoch empfohlen dies im Rahmen weiterer Untersuchungen eingehender zu prüfen.

Hinsichtlich des Ständerwerks, welches üblicherweise aus Konstruktionsvollholz gefertigt ist, stellen Kartonröhren zwar eine denkbare Alternative dar, können jedoch nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Es ist zu bedenken, dass sowohl der Anschluss der Röhren untereinander, als auch das Aufbringen der Beplankung einen erheblichen Aufwand darstellen würde. Da die Röhren im Gegensatz zu Vollquerschnitten wenig Materialstärke zur Befestigung bieten, könnte zu ihrer Verbindung miteinander auf eigens hierfür gefertigte Knotenpunkte zurückgegriffen werden und die Beplankung mittels eingeklebter Verstärkungen montiert werden (vgl. Kap 4.1.2 – MockUp Typ 2A). Fraglich ist ebenfalls der Feuerwiderstand der Röhren, welche durch ihre geringe Masse gegebenenfalls einem Brandangriff nicht lange genug standhalten könnten, um als sicherer Baustoff zu gelten. Zwar wäre eine Brandschutzbeschichtung der Röhren dem Grunde nach denkbar, dies würde jedoch ihre Rezyklierbarkeit stark einschränken oder sogar verhindern und wurde deshalb nicht weitergehend untersucht. Die begrenzte Marktverfügbarkeit nutzbarer Querschnitte stellt eine weitere Herausforderung dar. Zum Bezug von im Bauwesen üblichen Formaten müssten zunächst geeignete Wickelwerkzeuge gefertigt werden, welche entsprechende Profile herstellen könnten. Aufgrund der begrenzten Mittel konnte dies nicht in Angriff genommen werden, weshalb keine Ergebnisse hinsichtlich des Biege- oder Knickverhaltens von Kartonröhren gewonnen wurden. In Anbetracht der vielen Problematiken, die der Einsatz von Kartonröhren mit sich brächte, wird es für vertretbar gehalten die Ständerkonstruktion weiterhin in konventioneller Art aus Holz herzustellen.

In Bezug auf Dämmung, welche sich in den Zwischenräumen des Ständerwerks befindet, bieten sich zwei Alternativen. Während im konventionelles Ständerbau allerlei Arten von Dämmstoffen, ob nun Kunststoffschäume, Mineralfasern oder auch Schüttungen zur Anwendung kommen, ist in unserem Fall sowohl eine Schüttung aus Zelluloseflocken als auch eine Ausfachung mit Wellpappen denkbar. Zelluloseflocken kommen bereits als marktverfügbarer Baustoff bei Einblas- und Schüttdämmungen zum Einsatz und sind im Hinblick auf ihre Wärmeleitfähigkeit der Wellpappe um ca. 20% überlegen. Wellpappe-Platten hingegen bieten die Aussicht auf eine leichtere Verarbeitung auf der Baustelle, da sich wie herkömmliche Dämmplatten mit einer Handsäge konfektioniert werden können. Zudem weist Wellpappe, bei stehenden Wellen eine gute Druckfestigkeit auf. Würden sie in günstiger Ausrichtung in die Konstruktion eingebracht, könnten die Platten die Queraussteifung der Wandscheiben unterstützen. Auf diese Weise erscheint eine Materialeinsparung durch Reduktion der Beplankungsstärke oder der Ständerquerschnitte möglich.

Eine Herstellung der Fassade aus Papierwerkstoffen wird ausdrücklich nicht empfohlen. Es sind derzeit keine Papierwerkstoffe bekannt, die in unbehandelter Form den Auswirkungen von Wind und Wetter stand halten könnten. Die gewählte Ständerbauweise ist prädestiniert für die anschließende Montage einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassade. Bei dieser Konstruktionsweise lassen sich beliebige Bekleidungen auf eine Unterkonstruktion aufbringen. Mit Blick auf den ökologischen Anspruch des

Projekts empfiehlt sich hier die Wahl eines CO₂-neutralen Materials wie zum Beispiel Holz, welches als Rhombusschalung, Schindelung oder in auch anderen Verlegemustern aufgebracht werden könnte.

6.2 Bauklimatik

Konstruktiv wie auch bauphysikalisch wurde der Papierwandaufbau in Anlehnung an eine Leichtbau konzipiert und verschiedenen Varianten hinsichtlich eines verbesserten sommerlichen Wärmeschutzes untersucht. Durch die verschiedenen Verarbeitungsverfahren und Verarbeitungsschritte von Papierwerkstoffen, unterscheiden sich die physikalischen Werte von Papier stark. Wellpappe und Vollpappe haben beispielsweise unterschiedliche physikalische Eigenschaften, wobei diese im Herstellungsprozess durch die Verwendung von Leim zusätzlich weiter beeinflusst werden. Aus bauphysikalischer Sicht besteht so das Potenzial, dass die Papierbaustoffe sehr spezifisch auf ihren jeweiligen Einbauort in der Konstruktion angepasst werden können. Als Beispiel dient hier die Anforderung an eine innenliegende Dampfbremse. Nach Rücksprache mit Herstellenden könnte mithilfe des Herstellungsprozesses Vollpappen mit unterschiedlichen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen hergestellt werden. So könnten Vollpappen die Aufgabe einer Dampfbremse übernehmen. Darüber hinaus ist es denkbar, dass Schichten aus nur einem Material mehrere spezifische Aufgaben übernehmen (Dampfkontrolle, sommerlicher Wärmeschutz, Aussteifung, Schallschutz).

Wie bei Holzwerkstoffen wird derselbe Rohstoff (Holz/ Zellstoff) durch die Verarbeitungsweise in verschiedene Baustoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften verarbeitet. Papierbaustoffe können in dieser Logik auf einer nächsten Ebene der Kaskadennutzung (vgl. Abschnitt 6.3) agieren

Anforderung an den winterlichen Wärmeschutz: geringe Wärmeleitfähigkeit, geringer Wasserdampfdurchgangskoeffizient und dabei möglichst hohe Rohdichten und hohe spez. Wärmekapazitäten

Material	Quelle	Roh- dichte ρ in [kg/m ³]	Wärmeleit-fähigkeit λ in [W/(mK)]	Wasserdampf- diffusionswiderstand μ [-]	Spez. Wärme- kapazität c_{spez} kJ/(m ² K)
Wellpappe_max		250	0,06	21	2,1
Wellpappe_min		130	0,045	3	1,2
Zellulose		160	0,040	1/2	2,1

Tab. A 29: Wellpappe als Dämmstoff

Anforderung an die innere Beplankung: hohe Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen, hohe Wärmeleitfähigkeit und dabei möglichst hohe Rohdichte und spez. Wärmekapazität

Material	Quelle	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	Wasserdampfdiffusions- widerstandszahlen	Spez. Wärmekapazität
		ρ in [kg/m ³]	λ in [W/(mK)]	μ [-]	c_{spez} kJ/(m ² K)
KVP_I01_max		700	0,100	100	2,1
KVP_I01_min		700	0,070	10	1,2
OSB		630	0,130	169/250	2,5

Tab. A 30: KVP_I01 als innere Beplankung

Anforderung an äußere Beplankung: niedrige Wärmeleitfähigkeit, geringer Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen und dabei möglichst hohe Rohdichte und spez. Wärmekapazität

Material	Quelle	Rohdichte	Wärmeleitfähigkeit	W.dampfdurchgangs- Koeffizient	Spez. Wärmekapazität
		ρ in [kg/m ³]	λ in [W/(mK)]	μ [-]	c_{spez} kJ/(m ² K)
KVP_A01_max		280	0,062	26	2,1
KVP_A01_min		148	0,046	3	1,2

Holzfasserplatte

Tab. A 31: KVP_A01 als äußere Beplankung

Aufgrund der Ergebnisse der bauklimatischen Simulationen (vgl. Abschnitt 5.2.2) ist die Außenwandkonstruktion mit Papierbaustoffen betreffend dem sommerlichen Wärmeschutz ähnlich wie eine konventionelle Leichtbauweise einzuordnen. Indem man die jeweiligen Schichten des Papierwandaufbaus optimiert ist es möglich, dass die Performance zwischen einer konventionellen Leichtbauweise und einer konventionellen Massivbauweise einordnet. Dabei ist festzuhalten, dass neben Papierbaustoffen eine zusätzliche innere Beschichtung aus 20mm Lehm vorgesehen ist. Bei den Simulationen wird ersichtlich, dass die Bandbreite (max. und min. Werte, vgl. Abschnitt 5.2.2) der bauphysikalischen Werte von Papier einen nur geringen Einfluss auf die Auswirkungen hat (vgl. Abschnitt 5.2.1.3).

6.3 Kreislaufkonzept

Der Text gliedert sich anhand der Forschungsfragen P1- M2, die in 4.3.2 dargestellt sind.

Papierwerkstoffe zeigen durch die Treibhausgasbindung, die dem Herstellungsprozess zu geordnet wird, deutlich ökologische Vorteile gegenüber konventionellen Bauprodukten. In der Regel sind sie leichter und können allein dadurch Ressourcen einsparen. Selbst gegenüber Holzwerkstoffen können Papierwerkstoffe besser abschneiden; wie in 6.3.1 dargestellt ist kann eine Kartonverbundplatte gegenüber einer OSB-Platte mehr CO₂ Äquivalente binden. Das gilt für einen einmaligen Zyklus. Die Nutzungsdauer der Produkte müsste im nächsten Schritt gesondert betrachtet werden.

Pro 1 Kilogramm Referenzgewicht zeigen Papierwerkstoffe eine gute Bilanz. Sie variieren von -1,65 (Zellulose) bis zu -0,74 kg CO₂ Äquivalent (Wellstegplatte) und sind damit im negativen Bereich. Eine Ökobilanz wird daher immer empfohlen, so viel Material wie es die Funktion zu lässt zu nutzen. Im Vergleich zu Holzwerkstoffen sind die Werte allerdings etwas schlechter, was mit den Prozessschritten zu tun hat. Der Weg von Holz zum Papier ist länger als von Holz zum Holzwerkstoff. Der Einsatz von Sekundärmaterial wirkt sich positiv aus, jedoch bleiben die Werte von Papierwerkstoffen auch mit geringem Primäranteil über denen von Holzwerkstoffen.

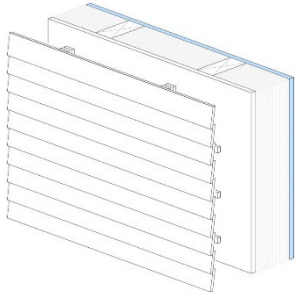
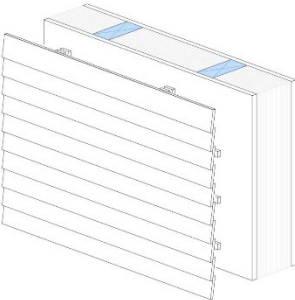
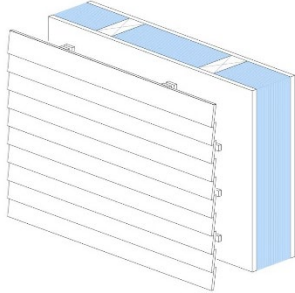
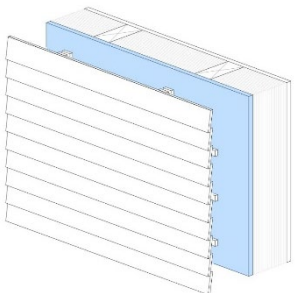
Der ökologische Vorteil ergibt sich aus der Fähigkeit mit wenig Gewicht eine Funktion zu erfüllen. Das wird deutlich bei der Gegenüberstellung der Dämmstoffe. Pro Kilo schneiden die Papierprodukte nur durchschnittlich ab, pro Funktion zeigen sie ihr Potential.

Für die Nachnutzung spielt die Lösbarkeit eine wesentliche Rolle. Die Tests mit den verschiedenen Klebstoffen und den jeweiligen Mengen zeigen, dass Dextrinkleber ein gutes Verhältnis von Haftkraft und Lösbarkeit hat. Auch in vollflächiger Verklebung sind alle Schichten trennbar. Die Trennung muss nicht im Rahmen der Dekonstruktion erfolgen, sondern kann während des Recyclings passieren. Vollflächig verklebter Weißleim (wasserfest) kann dazu genutzt werden in der Nutzungsphase die Funktion einer Folie zu übernehmen. Im Vergleich zu dieser konventionellen Variante ist der Klebstoffeinsatz ressourcenschonend, da deutlich weniger Material eingebracht wird. Für die Nachnutzung ergibt sich der Nachteil, dass sich größere Stickies bilden werden und dieser Teil dann für das Recycling verloren ginge.

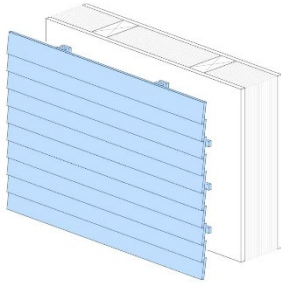
Die Umsetzung der Mock-Ups zeigt, dass die Trennbarkeit der Schichten und die Lösbarkeit verschiedener Komponenten im Ständerwerk gut umzusetzen ist. Das Zusammenführen von Wellpapier zu Paketen ermöglicht handliche Pakete, sowie gute ökologische Werte. Die Kartonverbundplatte unterstützt diese Tendenz.

Die Werte für die Fassadenbauteile liegen im Bereich von Holzkonstruktionen. Da alle Aufbauten einen relevanten Holzanteil haben, ist das wenig überraschend. Wird Dextrin für die Verklebung innerhalb der Schichten genutzt wird die Recyclingpotential erhalten. Im nächsten Schritt müssten die Holzverbindungen hinsichtlich ihrer Rückbaubarkeit untersucht werden.

6.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Pos.		RB	ISMD	IBEA	Fazit
1.1 und 1.2		Ausbesserbar als Schicht lösbar Verklebung der Lagen möglich	Aussteifung der Rahmenkonstruktion Brandschutz \geq B2 Sichtqualität wenn möglich - wenn nicht, Spachtel- und überstreichbar	Dampfdiffusionsdichter als Beplankung außen (Pos.3.1) möglichst hohe (thermische) Masse hohe Wärmeleitfähigkeit	Vollpappe mit wasserfesten Dispersionskleber (Alternativ Lehmbohle mit Lehmputz)
2.2		Lösbare Verbindungen Für Wiederverwendung \geq 2m Länge der Träger	Ausreichend Biege- (Dach/Boden) bzw. Knicksteif (Wand) Brandschutz \geq B2	λ um 0,12 W/(mK) Volumen möglichst minimieren (Abminderung Dämmwert Kern)	Holzrahmenbau
2.1		Lösbare Verbindung Trennbarkeit der Schichten Wasserfeste Verklebungen vermeiden	ggf. unterstützend wirksam für die Aussteifung der Wand- bzw. Dachscheiben	λ um 0,045 W/(mK) eher diffusionsoffen ev. (thermische) Masse	Wellpappe verbunden mit Dextrin oder genäht Alternativ Zellulosedämmung
3.1 und 3.2		Lösbare Verbindung Trennbarkeit der Schichten Leicht lösbare Verbindungsmittel für Schicht auf UK	Aussteifung der Rahmenkonstruktion Brandschutz \geq B2 Konstruktion gegen eindringende Feuchtigkeit geschützt, z.B. durch Folie	Dampfdiffusionsdichter als Beplankung innen (Pos. 1.2) Wärmedämmend (λ um 0,055 W/(mK)) Leicht hydrophile Beschichtung Außen	Wellpappe (vermeiden von Klebstoff)

4.0



Witterungsschutzschicht

Wie in Kap. 3.1. erläutert, wurde im vorliegenden Projekt von einer hinterlüfteten Fassade ausgegangen, deren Bekleidung nicht genauer betrachtet wurde

**Hinterlüftete Fassade aus mit Holzprofilen
Noch weiter zu spezifizieren**

Mit der Betrachtung der verschiedenen Disziplinen ergibt sich ein Anforderungsprofil an eine Fassade. Durch das Zusammenführen der Perspektiven Ökologie, Bauphysik/Bauklimatik und Tragwerk sowie die Verarbeitbarkeit lässt sich die Bandbreite an Konstruktionsvarianten und Materialkombinationen sinnvoll eingrenzen. Dabei beziehen sich die ökologischen Eigenschaften vor allem auf die Materialeigenschaften, während Tragwerk und Bauphysik/Bauklimatik eine Schicht genauer in den Fokus nehmen.

Dies könnte eine Konstruktion als Holzständerwerk mit Ausfachung aus Kartonverbundplatte sein, die entweder mit Wellpappe und Zellulose gefüllt ist.

6.5 Ausblick

Anhand der Empfehlungen der beteiligten Institute wurde durch *studio5a* ein Gebäudeentwurf ausgearbeitet, welcher die gewonnenen Erkenntnisse planerisch aufbereitet und als Grundlage für die Weiterverfolgung des Vorhabens dienen soll (vgl. Anh5_Gebäudeentwurf). Es wird empfohlen im Folgeprojekt tiefergehende Untersuchungen zu den in den vorigen Absätzen beschriebenen Themen durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Studie stellen oftmals lediglich eine erste Abschätzung dar und sollen als Richtungsweiser für die weitere Erforschung des Themenbereichs dienen. Auch sind die durchgeführten Experimente in Art und Umfang nicht ausreichend für die Erwirkung einer Zulassung im Einzelfall beim Deutschen Institut für Bautechnik. Eine solche ist für die Bauordnungsrechtlich konforme Errichtung eines Prototyp-Gebäudes aus Papier unerlässlich und wird mit Nachdruck empfohlen.

Um Bauschäden zu vermeiden, müssen die einzelnen Papierbaustoffe präzise aufeinander abgestimmt werden. Da vor allem betreffend des Dampfdiffusionswiderstands nur vereinzelt Werte vorhanden sind, und die bauphysikalischen Eigenschaften von Papierbaustoffen sehr stark variieren, sollten die Papierbaustoffe, mit welchen konkret geplant wird nochmals untersucht werden. Betreffend den sommerlichen Wärmeschutz sind die bauklimatischen Erkenntnisse belastbar. Sobald jedoch der konkrete Papierbaustoff festgelegt wurde, sollten auch hier nochmals mittels Simulation und den konkreten physikalischen Werten des Papierbaustoffes ein Nachweis geführt werden. Die hybride Bauweise (Papierbaustoffe und Lehm) wurde konstruktiv noch nicht getestet. Hier stellt sich die Frage wie gut der Lehmputz auf dem Papierwerkstoff haftet (als Ergänzung bietet sich eine Schilfmatte an) und wie sich der Papierwerkstoff auf den feuchten Putz reagiert. Alternativ könnte auch eine Lehmbauplatte vorgesehen werden, welche auf den Papierwerkstoff aufgetragen wird.

7 Literaturverzeichnis

- [Nab20] Naturschutzbund Deutschland e.V.: *Den ganzen Lebenszyklus beim Bauen in den Blick nehmen –eine Schlüsselfrage für den Klimaschutz*, Online-Dokument 2020
https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/aufruf_lebenszyklus_bauen_201208.pdf (abgerufen 02.03.2023)
- [Umw23] Umweltbundesamt: *Umwelt und Klima schützen –Wohnraum schaffen –Lebensqualität verbessern*, Online-Dokument 2023
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2023_uba_pos_wohnraum_bf.pdf (abgerufen 02.03.2023)
- [Umw22a] Umweltbundesamt: *Altpapier*, Website 2022 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#vom-papier-zum-altpapier> (abgerufen 02.03.2023)
- [Bau10] Baunetz: *275 Tonnen Altpapier Experiment auf Zollverein in Essen*, Website 2010
https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Experiment_auf_Zollverein_in_Essen_1293509.html (abgerufen 02.03.2023)
- [CV01] Cottrell & Vermeullen: *Westborough Cardboard Building*, Website 2001 <https://cv-arch.co.uk/westborough-cardboard-building/> (abgerufen 02.03.2023)
- [Fic23] Fiction Factory: *Wikkelhouse*, Website 2023 <https://wikkelhouse.com/> (abgerufen 02.03.2023)
- [Lat17] Latka, J. F.: *Paper in architecture: Research by design, engineering and prototyping.*, A+ BE| Architecture and the Built Environment 19, 2017.
- [BKH20] Bach, R.; Knaack, U.; und Hildebrand, L.: *Papier Fassaden: Entwicklung konstruktiver Prinzipien für Fassaden aus Papierwerkstoffen mit Fokus auf Brandschutz, Wärmedämmung, Feuchteschutz und ökologische Eigenschaften*, No. RWTH-2021-01599. Juniorprofessur für Rezykliergerichtetes Bauen, 2020.
- [Kan21] Kanli, E.: *Experimental Investigations on Joining Techniques for Paper Structures: A Showcase of Principles, Case Studies & Novel Connections Created in the Spirit of Architectural Engineering*, Vol. 60. Springer Nature, 2021.
- [Kiz23] Kiziltoprak, N.: *On the Bi-Axial In-Plane Behavior of Laminated Paperboard Components in Construction: A Representative Engineering Model*, Vol. 67. Springer Nature, 2023.
- [WBK21] Wolf, A.; Bach, R.; Kiziltoprak, M.; Wilfinger, M. und Knaack, U.: *A Full performance paper house*, Journal of Facade Design and Engineering, pp. 117-130, 2021.
- [Bun20] Bundesregierung: *Gebäudeenergiegesetz*, Gesetz 2020
- [Wol23] Wolf Bavaria GmbH: *PhoneStar Schalldämmung/Trockenestrich*, Website 2023 <https://www.wolf-bavaria.com/wissenswertes/phonestar-schalldaemmung-trockenestrich/> (abgerufen 02.03.2023)
- [Bet23] Betz Dämmelemente GmbH: *Fairwell ZVE Dämmung*, Website, 2023 <https://www.betz-daemmelemente.de/produkt/fairwell-zve-daemmelement/> (abgerufen 02.03.2023)
- [Deu13] Deutsches Institut für Normung: *DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden*, Norm 2013
- [Umw22b] Umweltbundesamt: *Wohnfläche*, Website 2022 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche> (abgerufen 02.03.2023)
- [Bun21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: *ÖKOBAUDAT-Datensätze*, Website 2021 https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html (abgerufen 02.03.2023)
- [Uba23] Ubakus: *U-Wert Rechner*, Website 2023 https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/?c=2&T_i=20&RH_i=50&Te=-5&RH_e=80&outside=0&bt=0&unorm=geg20alt&fz= (abgerufen 02.03.2023)
- [Voß13] Voß, D.: *Entwicklung einer einfachen und schnellen Labormethode zur Bewertung von Mikro- und Makro-Stickys AiF-Schlußbericht zum Aif-Forschungsvorhaben Nr. Aif 16709N*. Diss. PMV, 2013.
- [Eid06] Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: *Klebekurs*, Online-Dokument 2006
<https://people.phys.ethz.ch/~andreoli/Kurse/Klebekurs/Kleben-2.pdf> (abgerufen 02.03.2023)
- [Hes19] Hessische Landesregierung: *Hessische Bauordnung*, Gesetz 2019
- [Deu98] Deutsches Institut für Normung: *DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen*, Norm 1998
- [Eur18] European Committee for Standardization: *EN 13501-1 Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*, Norm 2018
- [Deu10] Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 1995-1-1 | 2010-12 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau*, Norm 2010
- [VJK12] Volkmer, T., Jon-Anton, S., Kranitz, K., Niemi, P.: *Untersuchungen zum Einfluss der Klebstoffart auf den Diffusionswiderstand von Holzverklebungen*, 2012, Bauphysik 34, 55–60.
<https://doi.org/10.1002/bapi.201200006>
- [RPM05] Rode, C., Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., und Harderup, L. E.: *Moisture buffering of building materials*. 2005 Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering

Anhänge

Anh1_Vorentwurf	Bauzeichnungen zu den Entwurfsvarianten der Voruntersuchung
Anh2_Konstruktionstypen	Axonometrische Darstellungen der vorgeschlagenen Konstruktionsweisen
Anh3_Dimensionierung	Schnitte und Axonometrische Darstellungen zur Dimensionierung der vorgeschlagenen Konstruktionsweisen
Anh4_PrototypenISMD	Axonometrische Darstellungen der vom ISMD gebauten Prototypen
Anh5_Gebäudeentwurf	Visualisierungen, Bauzeichnungen und Axonometrische Darstellungen des zur Ausführung empfohlenen Gebäudes