

## **Maßnahmenkatalog des Forschungsprojekts**

### **NACHHALTIGES MUSEUM DETMOLD**

Entwicklung von architektonischen und bauklimatischen Maßnahmen  
zum Bau und Betrieb Nachhaltiger Museen  
am Beispiel des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes  
des LWL-Freilichtmuseums Detmold,  
Westfälisches Landesmuseum für Alltagskultur

#### **1. Stufe: Wissenschaftliche Voruntersuchung und Parameterstudie zu architektonischen und technischen Einzelmaßnahmen**

## **Auskunft über den Antragsteller und Kooperationspartner**

### **Antragsteller:**

Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL)

LWL-Bau- und Liegenschaftsbetrieb

Technischer Leiter

Michael Dauskardt/Matthias Gundler

Warendorfer Straße 2, 48133 Münster

+49 (0)251 - 591 221 | matthias.gundler@lwl.org

### **Kooperationspartner:**

Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe (Projektleitung)

Future Energy – Institut für Energieforschung

Prof.‘in Dr.-Ing. Susanne Schwickert (Bauklimatik, Bauphysik, Monitoring)

Prof. Dr. Johannes Üpping (Energiesysteme, Regenerative Energien, Monitoring)

Emilienstraße 45; 32756 Detmold

+49 (0)5231 769-6182 | susanne.schwickert@th-owl.de

ACMS Architekten GmbH (Architektur, Ressourcenschonung)

Dipl.-Ing Olaf Scheinpflug/Dipl.-Ing. Michael Müller

Friedrich-Ebert-Straße 55, 42103 Wuppertal

+40 (0)202 - 445 71 31 | m.mueller@acms-architekten.de

Hochschule Bochum

Prof. Dipl.-Ing. Volker Huckemann (Lebenszyklusanalyse, Baustoffe, Rezyklierbarkeit)

Fachbereich Architektur

Lennershofstr. 140, 44801 Bochum

+49 (0)171-6142446 | volker@v-huckemann.de

## **Autoren**

### **Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe**

#### **Future Energy – Institut für Energieforschung**

Prof.‘in Dr.-Ing. Susanne Schwickert

Prof. Dr. rer. nat. Johannes Üpping

B.A. Tatiana Zuchowska

M. Eng. María González

B.A. Kim Kristin Blaschke

### **ACMS Architekten GmbH**

Prof. Dipl.-Ing Christian Schlüter

Dipl.-Ing Olaf Scheinpflug

Dipl.-Ing. Michael Müller

M.Sc. Simon Waigand

M.Sc. Niklas Wolters

### **Hochschule Bochum**

Prof. Dipl.-Ing. Volker Huckemann

cand. arch. Jeronimo Latz

M.Sc. Imke Keuth

## Danksagungen

Wir danke den externen Referenten unserer gemeinsamen Workshops:

### **Martin Rauch**

Lehm Ton Erde Baukunst GmbH

### **Jörg Meyer**

Firma conluto - Vielfalt aus Lehm

### **Dipl.-Ing. Alexander Schröter**

Müller-BBM GmbH

### **Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter,**

Technische Universität München

### **Prof.'in Dr. Linda Hildebrand,**

RWTH Aachen

Zusätzlich danken wir für die Mitarbeit am Abschlussbericht:

### **B.A. Stefan Jättkowski**

### **M.Ed. Marco Schroeter**

### **Christin Schäfers**

### **Dr.-Ing. Tobias Wiegand**

Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

### **Martin Schwarz**

Wald und Holz NRW

Zentrum für Wald und Holzwirtschaft (FB V)

### **René Görnhardt**

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)

## Inhalt

1	Einleitung und Ausgangslage.....	10
1.1	Ressourcen- und Energieverbrauch im Bausektor .....	10
1.2	Potenzial von Museumsbauten .....	11
2	Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	12
3	Vorgehensweise .....	14
3.1	Inhaltliche und strukturelle Anpassung des Abschlussberichts.....	14
3.2	Analytische Vorgehensweise: .....	14
3.3	Betrachtungsbereich „historische Baustoffe“ .....	15
3.4	Strategie der Bauklimatik und Vorgehensweise .....	15
3.5	Bewertungsmatrizen und Ökobilanzierung.....	16
3.6	Energiesysteme und Betrieb .....	17
4	Material.....	18
4.1	Primärkonstruktion/Rohbau .....	18
4.1.1	Holz.....	18
4.1.2	Beton.....	21
4.1.3	Lehm .....	23
4.2	Ausbaustoffe.....	25
4.2.1	Dämmstoffe.....	25
4.2.2	Bekleidungen / Beplankungen .....	28
5	Bauteil.....	31
5.1	Erdberührte Bauteile.....	31
5.1.1	Funktion .....	31
5.1.2	Ökobilanz und Kreislauffähigkeit .....	32
5.1.3	Regionalität .....	33
5.1.4	Bauklimatik.....	34
5.2	Außenwand .....	36
5.2.1	Funktion .....	36
5.2.2	Kreislauffähigkeit / Ökobilanz .....	37
5.2.3	Regionalität .....	38
5.3	Dach (Tragwerk).....	38
5.3.1	Funktion .....	38
5.3.2	Ökobilanz / Kreislauffähigkeit .....	39
5.3.3	Regionalität .....	40

5.4	Decke .....	41
5.4.1	Funktion .....	41
5.4.2	Ökobilanz / Kreislauffähigkeit .....	42
5.4.3	Regionalität .....	42
5.5	Innenwand (tragend).....	43
5.5.1	Funktion .....	43
5.5.2	Ökobilanz / Kreislauffähigkeit .....	44
5.5.3	Regionalität .....	44
5.6	Innenwand (nichttragend) .....	44
5.6.1	Funktion .....	44
5.6.2	Ökobilanz / Kreislauffähigkeit .....	45
5.6.3	Regionalität .....	45
5.6.4	Bauklimatik.....	45
6	Raum.....	50
6.1	Ausstellungsraum .....	50
6.1.1	Raumklima .....	51
6.2	Zwischenlager .....	52
6.3	Open Space.....	53
6.4	Zonen ohne konservatorische Anforderungen .....	54
6.4.1	Steigerung der Raumluftqualität durch Pflanzen.....	54
6.4.2	Adaptive Komfortsysteme als Alternative oder Ergänzung zum Hauptklimatisierungssystem .....	59
7	Gebäudestruktur .....	62
7.1	Funktionale Gliederung des Museumskomplexes .....	62
7.1.1	Ausgangssituation .....	62
7.1.2	Funktionale Gliederung .....	62
7.1.3	Anordnung.....	63
7.1.4	Erschließung und Adressbildung .....	64
7.1.5	Technik .....	65
7.2	Ökobilanzierung.....	65
7.3	Bauklimatik .....	66
7.3.1	Zonierung des Ausstellungsbereichs .....	66
7.3.2	Zonierung und Lage .....	67
7.3.3	Kombinationsbetrachtung.....	68

8	Energiesystem (incl. Monitoring) und Betrieb .....	70
8.1	Energieflussmodell .....	70
8.1.1	Energieflussmodell .....	71
8.2	Thermische Energieflüsse .....	71
8.2.1	Elektrische Energieflüsse .....	73
8.2.2	Netzdienlichkeit .....	76
8.3	Energiemanagement Konzept.....	77
8.3.1	Betriebsstrategie / Ablauf .....	77
8.4	Monitoring.....	78
8.4.1	Hardware.....	78
8.4.2	Qualität der Messwerte.....	79
8.4.3	Kostenübersicht Monitoring .....	80
9	Fazit/ Offene Fragestellung (zukünftiger Forschungsbedarf).....	80
10	Didaktischer Ausblick.....	84
10.1	Gesellschaftliche Verantwortung .....	
	und museale Bildungskommunikation .....	84
10.2	Baumaterialien und Gebäudestruktur .....	
	mit Blickachsen im Wissensfokus.....	85
10.3	Mediengestützte Planung des Museumsaufenthaltes: .....	
	Verringerung des Carbon Footprint .....	85
11	Literaturverzeichnis.....	86
Anhang .....		96
A1: Arbeitsgruppe 1 Architektur, Ressourcenschonung .....		105
A2: Arbeitsgruppe 2 Bauklimatik .....		179
A3: Arbeitsgruppe 4 Lebenszyklusanalyse, Baustoffe, Rezyklierbarkeit..		252

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Moderne Zangenkonstruktion mit Hartholzdübel.....	18
Abbildung 2: Traditionelle Holzverbindung: Hakenblatt mit Hartholzdübel .....	18
Abbildung 3: Hohlkörper in Betondecke .....	21
Abbildung 4: Opus caementicium, Pantheon (128 n. Chr.), Rom .....	21
Abbildung 5: Gefach mit Lehm .....	23
Abbildung 6: Vorgefertigte Stampflehmblöcke.....	23
Abbildung 7: Nachbau einer gedämmten Wand aus der Bronzezeit.....	25
Abbildung 8: Gefachdämmung aus Baustroh	25
Abbildung 9: Vergleich des Global-Warming-Potentials für Stroh, Holzspäne und Zellulosedämmung .....	27
Abbildung 10: Naturstein als Fußbodenbelag.....	28
Abbildung 11: Lehmbauplatte.....	28
Abbildung 12: Ökologischer Vergleich zwischen Schaumglasplatten und -schotter.....	33
Abbildung 13: Simulierte Dämmmaßnahmen .....	36
Abbildung 14: Energiebedarf für verschiedene erdberührte Dämmmaßnahmen bei 20 °C Solltemperatur innen .....	35
Abbildung 15 Auszug aus dem ökologischen Vergleich verschiedener Außenwand-Konstruktionen .....	37
Abbildung 16: Ausschnitt vom Erdgeschoss Grundriss des geplanten Ausstellungsgebäudes.....	46
Abbildung 17: Außenansicht und Raumanordnung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus.....	47
Abbildung 18: Ausstellungsraum.....	50
Abbildung 19: Materiallager .....	52
Abbildung 20: Open Space .....	53
Abbildung 21: Behaglichkeitsbereich im Büro .....	55
Abbildung 22: Vergleich beider Messreihen über einen Zeitraum von 48 Stunden.....	57
Abbildung 23: Die Büroräume im 2. OG des geplanten Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des Detmolder Freilichtmuseums .....	58
Abbildung 24: Testgruppe und Messgeräte.....	60
Abbildung 25: TAC (Tastatur, Infrarotfußwärmer und Kopfventilation).....	61
Abbildung 26: PSC Chairs mit User Interface.....	61
Abbildung 27: Aufteilung in Nutzungseinheiten .....	62
Abbildung 28: Ausrichtung und Positionierung auf Grundstück und Gelände .....	63
Abbildung 29: Passive Klimatisierung durch von „kalten“ und „warmen“ Zonen .....	63



Abbildung 30: Optimierte Wegeführung intern (links) und extern (rechts).....	64
Abbildung 31: Technikzone.....	64
Abbildung 32 Erste Hochrechnung einer Ökobilanz für das neue Empfangsgebäude- Vergleich ökologischer Konstruktionen mit einer „konventionellen“ Bauweise .....	66
Abbildung 33: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus ohne Vorzone.....	66
Abbildung 34: Zielmodell, Grundriss- und Schnittzeichnung - Depot, Treppenhaus, Foyer, Ausstellung.....	68
Abbildung 35 Zielmodell A: sich frei einstellende Innentemperaturen im Vergleich .....	69
Abbildung 36: a) Anzahl der Stunden bei bestimmten Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten. b) In Rot die Werte, die 90% aller Stunden beinhalten, in Blau die Werte die nur 10% aller Stunden beinhalten.....	70
Abbildung 37: Schematische Darstellung des Museumsgebäudes mit elektrischen Energieflüssen in Blau, thermischen Energieflüssen in Rot und internen Prozessen in Orange.....	71
Abbildung 38: Kennlinien der Heiz- und Kühllast und die Verteilung der Tagesmitteltemperaturen. ....	72
Abbildung 39: Thermischer Leistungsbedarf für das Heizen und Kühlen mit und ohne die Pufferwirkung des Gebäudes a) (Ausschnittsweise für einige Tage im Oktober b)). ....	73
Abbildung 40: Aufnahmeleistungen der WP zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfes.....	73
Abbildung 41: Durch PV erzeugte Leistung in Blau ideal modelliert und in Rot mit Integration von Wolken und Betriebstemperaturen. ....	74
Abbildung 42: Auf 10kW Grundlast normiertes Lastprofil der Liegenschaft LWL Museum Detmold .....	74
Abbildung 43: Täglicher CO <sub>2</sub> Ausstoß der WP für den normalen WP-Betrieb (rot) und den Betrieb mit optimalem EM (blau).....	75
Abbildung 44: Schematische Darstellung des Netzes mit erneuerbaren Energieträgern und den größten Verbrauchern im Stromnetz; ergänzt um eine Informationsstruktur in Rot, die das Wetter, den Markt und die aktuelle Netzsituation mit einbezieht .....	76
Abbildung 45: Schematische Darstellung des Monitoringkonzepts. Smart Meter und Senseboxen sind skalierbar über einen Modbus TCP/IP verbunden. ....	78
Abbildung 46: a) Temperaturverlauf einer im Innenbereich aufgestellten Sensorstation. b) Luftfeuchtigkeitsverlauf einer im Innenbereich aufgestellten Sensorstation. Jeweils mit Datenfilterung.....	79
Abbildung 47: Wirkleistungsverlauf eines Haushaltes mit Wärmepumpe gemessen mit dem EM300. ....	80

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturen für das Referenzjahr vom Deutschen Wetterdienst.....	72
--	----

# 1 Einleitung und Ausgangslage

## 1.1 Ressourcen- und Energieverbrauch im Bausektor

Das neue Eingangs- und Ausstellungsgebäude für das LWL-Freilichtmuseum Detmold strebt nicht nur eine wichtige Rolle als Kommunikations-, Lehr- und Forschungsplattform an, sondern versteht sich auch als beispielhaftes Projekt im zukunftsfähigen Umgang mit Ressourcen und Energie. Ökologische Nachhaltigkeit ist ein Thema, welches den Bausektor im besonderen Maße betrifft. In Deutschland wurden im Jahr 2016 insgesamt 564 (vgl. Schwarzkopp et al. 2019: 47) Millionen Tonnen mineralische Primärrohstoffe abgebaut und zu einem großen Teil in der Baustoffindustrie verarbeitet, wodurch der Baubranche etwa 60% des Ressourcenverbrauchs des Landes zugeordnet werden kann. Die Bauindustrie ist außerdem für etwa 35% des Energieverbrauchs und damit maßgeblich für einen großen Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland verantwortlich (vgl. Sobek 2013: 10-13). Allein die bei der Herstellung von Beton verursachten Emissionen machen bis zu 8% (vgl. Beyond Zero Emissions (Hrsg.) 2017: 7) des weltweiten und menschengemachten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes aus. Darüber hinaus verursacht die Bauindustrie rund 53% (vgl. Umweltbundesamt (Hrsg.) 2019: 3) der deutschlandweit anfallenden Abfallstoffe. Das Pariser Klimaabkommen sieht vor, die Erderwärmung auf 1,5K zu begrenzen und bis 2050 weitgehend treibhausgasneutral zu werden. Durch verantwortungsvollen Umgang mit der Umwelt kann und muss der Bausektor bei dem Erreichen der Klimaziele eine Schlüsselrolle einnehmen.

Das geplante Museumsgebäude soll hierbei als Leuchtturmprojekt dienen und Möglichkeiten aufzeigen, wie öffentliche Bauten diesem hohen Anspruch gerecht werden können.

Es wird ein essenziell CO<sub>2</sub>-reduzierter Bau angestrebt, gleichzeitig aber auch ein Fokus auf kreislaufgerechtes Rohstoffmanagement gelegt. Lange konzentrierte sich nachhaltiges Bauen auf das Senken des Energieverbrauchs im Betrieb des Gebäudes und es können heute durch optimierte Gebäudetechnik und Bauteile sehr geringe Energiebedarfe, besonders bei Neubauten mit üblichem Raumklimaansprüchen, erreicht werden. Um aber eine ganzheitliche Reduzierung von schädlichen Umwelteinflüssen zu erreichen, muss der gesamte Lebenszyklus des Gebäudes betrachtet werden. Die Ökobilanzierungen stellen dazu eine Methode dar, um Produkte und Gebäude hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit zu bewerten und vergleichbar zu machen. Dabei wird die Herstellung, Errichtung und Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung, jeweils in Bezug auf Verfügbarkeit und Regeneration, dem Primärenergiebedarf und der daraus resultierende (Treibhausgas-) Emissionen und Materialeinsatz, berücksichtigt und bilanziert. Gütezeichen, Zertifikate (bsp. Blauer Engel) und Umweltprodukt-Deklarationen geben zusätzlich umfangreiche Produktinformationen, wie z.B. einen möglichen Schadstoffgehalt. Die quantitative Bewertung eines Kreislaufpotenzials von Baukonstruktionen wird sehr begrenzt und lediglich qualitativ in aktuellen Zertifizierungssystemen berücksichtigt und ist daher Bestand der aktuellen Forschung (Bergische Universität Wuppertal) (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 108).

Zusätzliche Bewertungsgrundlagen bieten Konzepte wie Cradle-To-Cradle, welches vordergründig nachhaltige Stoffkreisläufe behandelt, oder Urban Mining, welches die gebaute Umwelt als Rohstoffquelle betrachtet und sich auf mögliche Sekundärnutzungen von Baustoffen konzentriert. Zwar wird ein Großteil der anfallenden Bauabfälle, hauptsächlich mineralischer Bauschutt, beispielsweise im Straßenbau weiterverwendet, jedoch kommt es dabei zu einem deutlich Wertverlust (Downcycling), der durch sortenreinen Rückbau und bestmögliche Nachnutzung von Bauteilen vermieden werden kann. Sonstige Bauabfälle landen auf Deponien oder werden thermisch verwertet. Da der Rückbau und die Nachnutzung von Bauteilen in der Planung bislang kaum berücksichtigt werden, ist qualitativ hochwertiges Recycling von Bauabfällen meist arbeitsintensiv und somit tendenziell unwirtschaftlich.

Zukunftsfähiges Bauen beschäftigt sich demnach bereits in frühen Planungsphasen mit der Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen und einer Kaskadennutzung der einzelnen Wertstoffe.

Nachhaltiges Bauen ist nicht nur eine naturethische Pflicht, die unser aller Lebensraum zu bewahren versucht, sondern bietet zudem das Potenzial lokale (Bau-)Kultur zu fördern, Wissen über regionale Ressourcen und traditionelles Handwerk zu bewahren und zu vermitteln. Zudem unterstützt es die Wertschätzung von gesundem Bauen aus natürlichen Rohstoffen. Es gilt, umwelt- und ressourcenschonende, treibhausgasarme und recyclingoptimierte Bauweisen, nach kontemporärem Stand der Technik und Wissenschaft, unter Berücksichtigung der komplexen Anforderungen an zeitgenössisches Bauen mit wirtschaftlichen Interessen in Einklang zu bringen.

## **1.2 Potenzial von Museumsbauten**

Museen haben die bedeutsame Aufgabe des Forschens, Vermitteln, Bewahren und Sammeln von Kulturgütern. Sie umfassen das kulturelle Erbe der Menschheit und spiegeln die gesellschaftliche Entwicklung wieder. Das Konservieren von Kulturartefakten ist eine essenzielle Aufgabe sowie eine Investition für nachfolgende Generationen und daher von besonderem öffentlichem Interesse. Insofern werden Museumsbauten für eine lange Nutzungsdauer konzipiert und weisen in der Regel einen hohen architektonischen, baukulturellen und städtebaulichen Wert auf. Darüber hinaus zählt der Museumsbau aufgrund seiner Öffentlichkeitswirkung und Funktion zu den bedeutendsten und repräsentativen kulturellen Bauaufgaben.

Angesichts der öffentlichen und musealen Nutzung sind Museumsbauten in vielerlei Hinsicht hoch komplexe Gebäude. Um konservatorischen, raumklimatischen und musealen Anforderungen der Ausstellungsstücke gerecht zu werden, bedarf es in der Regel eines umfangreichen Einsatzes von Gebäudetechnik (Lüften, Kühlen, Heizen und Beleuchtung), der in der Regel mit hohen Energieverbräuchen und Kosten verbunden ist. Aufgrund der permanenten Anforderungen an eine Klimakonstanz fällt der Energieverbrauch von Museumsbauten relativ hoch ins Gewicht.

Darüber hinaus weist der großmaßstäbliche Museumsbau aufgrund von großen und möglichst flexibel nutzbaren Räumen erhöhte bauphysikalische und konstruktive Anforderungen auf. Diese liegen im Bereich der Belastbarkeit, Dauerhaftigkeit und der Tragfähigkeit, um weite Raumtiefen zu überspannen. Zudem können die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudekonstruktion den Erhalt eines klimatisch adäquaten Umfeldes unterstützen. Hier finden in der Regel Massivbauweisen Anwendung, die aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit zur Stabilisierung des Raumklimas beitragen. Konventionelle Massivbauweisen, u.a. aus zementbasierten Baustoffen, gehen jedoch mit ökologischen Nachteilen sowie einem hohen Energie- und Ressourcenverbrauch einher.

Nachhaltige Museumsbauprojekte müssen gerade in der Gemengelage der Wechselwirkungen zwischen konservatorischen Anforderungen und Energiebedarf im Museumsneubau zum einen verstärkt passive Maßnahmen integrieren, um gezielt aktive Klimatisierungsmaßnahmen zurückzufahren. Adaptive Maßnahmen können einen flexiblen und bedarfsgerechten Betrieb entsprechend unterstützen. Zum anderen steht die Etablierung alternativer in Hinsicht auf Ressourcenverbrauch und klimarelevant unproblematischer Baumaterialien im Museumsbau noch aus, die hinsichtlich eines geringeren Anforderungskanons beispielsweise im Wohnungsbau schon Gang und Gebe sind.

Der intelligente Einsatz von Energie im konkreten Zusammenspiel mit den individuellen Gebäudeeigenschaften birgt gerade im Museumsbau mit den strengen klimatischen Anforderungen und hohen Energieverbräuchen große Potenziale. Komplexe Technologien wie ein Energiemanagement, das durch Algorithmen automatisiert viele Informationen verarbeitet und Entscheidungen trifft, werden

die energiebasierten Emissionen des Museumsgebäudes nachhaltig verringern und so zu einer gelungenen Energiewende beitragen.

Aufgrund hoher baukonstruktiver und bauphysikalischer Anforderungen, einem hohen Material- und Energieeinsatz, einer überdurchschnittlichen Betriebsenergie auf der einen Seite sowie der öffentlichen Relevanz und der Funktion der Wissens- und Kulturvermittlung auf der anderen Seite, bietet der Museumbau ein großes Potenzial, die drängenden Klima- und Umweltthemen zu vermitteln, diese Themen im didaktischen Konzept zu integrieren und eine Vorbildfunktion im nachhaltigen und effizienten Umgang mit Ressourcen einzunehmen. Museen haben durch die intensive und kontaktgeprägte Nutzung eine besondere Vorbildfunktion und die demonstrierten Technologien werden durch die Besucher in die Gesellschaft getragen. Dieses Potenzial soll mit dem Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäudes für das Freilichtmuseum (FLM) Detmold des Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL), im höchsten Maße ausgeschöpft werden.

## **2 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Ziel des Projektes war die Erarbeitung eines Maßnahmenkatalogs, der innovative Maßnahmen („Bausteine“) aus den Fachdisziplinen Architektur, Bauphysik und Bauklimatik, Energiesysteme und nachhaltige Komponenten für den Gebäudebau - begleitend zur architektonischen und fachspezifischen Bauplanung - identifiziert, quantifiziert und bewertet. Die relevanten Bausteine zur ressourcenschonenden Errichtung und Betriebsweise sollen nach Fertigstellung des Museums im Zuge einer späteren Monitoringphase messtechnisch und simulationstechnisch vertieft untersucht, evaluiert und gegebenenfalls nachjustiert werden. Die Untersuchung forciert vor allem die Übertragbarkeit auf bestehende und zukünftige Museumsgebäude. Ergebnisse der Berechnungen und Bewertungen sollen übersichtlich und nachvollziehbar hinsichtlich der Wirksamkeit einzelner Nachhaltigkeitsbausteine aufbereitet Architekten, Fachplanern, Bauherren und weiteren Entscheidungsträgern als Orientierung dienen. Das neue Eingangs- und Ausstellungsgebäude hat die Aufgabe, eine wichtige Brücke zwischen der zeitgenössischen und historischen Architektur zu schlagen, um auf dieser Basis neue didaktische Möglichkeiten zur Bewusstseins-schaffung einer nachhaltigen Lebensweise für die Nutzer zu bieten.

Der angestrebte energetische Gebäudestandard ist eng verbunden mit dem Umfang der bautechnischen Ausrüstung, der Energiegewinnung sowie den Ansprüchen des Nutzers. Das Projektteam präferierte in diesem ersten Schritt Lösungen über passive, quasi-passive beziehungsweise bauliche Maßnahmen, die i.d.R. auch kostengünstiger in der Konstruktion und Unterhaltung als aktive Maßnahmen sind. Die Bereitstellung der benötigten Ressourcen und des letztlich verbleibenden Energiebedarfs soll darüber hinaus in einem weiteren Schritt möglichst klimafreundlich geschehen. Mögliche Untersuchungsansätze betreffen:

- Gebäudekonstruktion, Baustoffwahl und Fassadenausbildung (Speichermasse im Holzbau, Hybridbauweise, Phase-Change-Materialien, Lehm- als Feuchte- und Wärmespeicher, historische Baustoffe, Fensterflächen)
- direkte oder indirekte Nutzung örtlicher Gegebenheiten zur Verbesserung des Raumklimas und der Energiebilanz (Wasser, Potenzial erdberührter bzw. unterirdischer Gebäudeteile, Lüftungskonzepte mit möglichst unkonditionierter Außenluft, Pflanzen und Fassadenbegrünung)
- Energieerzeugung und –speicherung (u.a. Nutzung oberflächennaher thermischer Energie mittels Erdreichwärmetauscher, Geothermie o.ä., Solarstrom)

Damit diese baulichen Randbedingungen umgesetzt und dem Nutzungsverhalten entsprechend sinnvoll betrieben werden können, muss das Gesamtsystem energietechnisch vorausschauend und intelligent betrieben werden. Dazu sind alle Energie- und Stoffflüsse zu erfassen und mit dem Nutzungsverhalten und den Komfort- und Klimaansprüchen in Einklang zu bringen. Ein zu entwickelndes Energiemanagement-System kann diese Anforderungen erfüllen und zusätzlich den Anteil an erneuerbaren Energiequellen maximieren. Neben der Integration von erneuerbaren Quellen vor Ort sollte ein solches „regional nachhaltiges Museum“ auch das Stromnetz und damit seine energetische Umwelt stützen, indem es sich netzstabilisierend verhält.

Eine besondere Herausforderung im geplanten Gebäude liegt bei der variablen Nutzung und den großen Anteilen unterirdischer Räume, was zugleich großes Potenzial zur Energieverschiebung bietet. So müssen möglicherweise unterirdische Gebäudeteile noch beheizt werden, obwohl in oberirdischen Gebäudeteilen mit größeren Glasflächen bereits gekühlt werden muss. Dadurch ist es nötig, sowohl die Speicherfähigkeit des Gebäudes in mehrere Speichersysteme zu teilen als auch die Energie variabel zu speichern und dabei interne Energieflüsse zu berücksichtigen. Hierbei helfen beispielsweise die geschickte Nutzung von oberflächennaher Geothermie in Kombination mit den internen Wärmeverteilsystemen sowie der Einsatz von Raumlufttechnik. Auch die Anpassung eines Museums der Zukunft an den Klimawandel oder eine Veränderung der Besucherzahlen und -ströme sollen untersucht werden. Innerhalb von Simulationsmodellen können diese Tendenzen als äußere Randbedingungen auf das Gebäude übertragen und untersucht werden.

Im Streben nach einer positiven Energiebilanz kommt der Aktivierung von Gebäuden als Energieproduzent eine immer höhere Bedeutung zu. Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien und Speichern in Kombination mit einem Energiemanagement-System werden aktiv CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden. Energieüberschüsse können bei der Weiterentwicklung von elektrischer Mobilität zusammen mit der Integration von Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden, ebenso wie die zukünftigen Schnittstellen mit dem Energieversorger. Auch wenn aktuell noch nicht klar ist, wie eine solche Schnittstelle spezifiziert ist, sollten bereits im Projektstadium Voraussetzungen für beispielsweise variable Preise oder eine CO<sub>2</sub>-Optimierung im Rahmen einer CO<sub>2</sub>-Steuer (im Stromsektor) geschaffen werden.

Neben einem energetischen Echtzeitmonitoring für die Nutzer ist in einem Museum zusätzlich die Schnittstelle zum Besucher zu entwickeln. Komplexe Energiemanagement-Systeme treffen viele Entscheidungen zum Betrieb aller energetischen Komponenten, die oftmals auf den ersten Blick für Besucher unlogisch wirken. Daher muss im Rahmen des Einsatzes im nachhaltigen Museum didaktisch sinnvoll das Energiesystem und die Versorgung durch das Energiemanagement-System erklärt werden.

Darüber hinaus gibt es jedoch auch viele Fragestellungen zur tatsächlichen Nachhaltigkeit beziehungsweise dem Einsatz an baulichen Ressourcen insbesondere bei der Verwendung von Holz. Ein ressourcenschonendes Gebäude sollte auch im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung und damit unter Berücksichtigung von Herstellung, Unterhalt und Rückbau als Gesamtsystem einen minimierten Energieverbrauch haben. Aufgrund der im gesamten Lebenszyklus betrachteten, positiven primärenergetischen Energiebilanz des nachwachsenden Baustoffes Holz bietet dieser hierfür die besten Voraussetzungen, ist aber nur Basis der zu prüfenden Gesamtkonstruktion mit Innovationsthemen wie:

- Recyclingfähigkeit von Holzbauteilen (IT-gestützte Formatierung von Holzbauteilen aus Bestandshölzern, Holzkonstruktionen ohne Stahl/Verbindungsmitel, zerstörungsfreie Konstruktion/Rückbau)

- Zukunftsweisender Holzbau (z.B. Decke aus "selbstkrümmenden" Holz-Formteilen, Holzdecke aus robotergeschnittenen Holzteilen)

Diese notwendigen Maßnahmen und Bausteine wurden mit wissenschaftlichen Methoden priorisiert und zu einem geeigneten und integralen Konzept eingegrenzt, das mit dem Bauherrn, den Projektpartnern und Fachplanern diskutiert und abstimmt wurde.

Im Projekt steht langfristig neben der Entwicklung eines möglichst nachhaltigen Eingangs- und Ausstellungsgebäudes mit hoher Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Museumsgebäude noch ein weiteres Thema im Vordergrund: Die Empfangs- und Museumssituation bietet die hervorragende didaktische Möglichkeit zur Vermittlung und Kommunikation einer differenzierten Nachhaltigkeitsbewertung in Gestalt eines Leuchtturmprojektes sowie darauf basierend die Chance einer Stärkung des Nachhaltigkeitsbewusstseins und -handelns bei den Besuchern selbst. Das geplante Eingangs- und Ausstellungsgebäude fungiert somit als Schnittstelle zwischen der zeitgenössischen und historischen Architektur. In Kombination mit den Ausstellungen im Freilichtmuseum, in denen historische Gebäude, aber auch der damalige Alltag erlebbar gemacht wird, lassen sich viele neue Bezüge zum Umgang mit Ressourcen, der passiven Raumklimakonditionierung sowie suffizienten Lebensweise adressieren und ins Bewusstsein rufen. Entsprechende museumspädagogische Methoden und Maßnahmen sind ebenfalls planungsbegleitend vorzubereiten und im späteren Betrieb umzusetzen und zu evaluieren.

### 3 Vorgehensweise

#### 3.1 Inhaltliche und strukturelle Anpassung des Abschlussberichts

Im Rahmen der Erarbeitung des Abschlussberichts der ersten Forschungsphase haben sich die Projektpartner auf eine abweichende Gliederung des Kurztexes zum Projektantrag (Phase I) geeinigt. Die ursprünglich angedachte Unterteilung in Arbeitspakete, die den jeweiligen Forschungspartnern zugeordnet sind, wurde durch eine integrale Struktur ersetzt, die von allen Partnern gleichermaßen mit Inhalt gefüllt wird. Ziel dieser Abweichung ist es, die Lesbarkeit und Aussagekraft durch eine kurze und prägnante Zusammenstellung der Arbeitsergebnisse zu erhöhen und wiederkehrende Textelemente zu vermeiden. Der Anhang ist gemäß dem Projektantrag den Arbeitspaketen und somit den Projektpartnern zugeordnet und bietet dem Leser umfangreiche Informationen zu den Arbeitsergebnissen der jeweiligen Forschungsthemen.

#### 3.2 Analytische Vorgehensweise:

1. Im ersten Schritt werden, analog zur Kapitelbezeichnung dieses Kurztexes, die **Materialien** des o.g. eingegrenzten Betrachtungsbereichs mittels umfangreicher Bewertungsmatrizen auf ihre Potenziale hinsichtlich der Ökobilanz, Kreislauffähigkeit, Regionalität im Umkreis 200km um Detmold und die Funktionalität im modernen und großmaßstäblichen Museumsbau untersucht und untereinander vergleichbar gemacht.
2. Baustoffe mit einem hohen Anwendungspotenzial finden im nächsten Schritt in **Bauteilvarianten** Anwendung, welche wiederum in ähnlich aufgebauten Matrizen bewertet werden. An dieser Stelle fließen bauphysikalische Aspekte, wie hygroskopische und thermische Eigenschaften, mit ein, welche für das spezifische Anwendungspotenzial im klimatisch anspruchsvollen Museumsbau von besonderer Bedeutung sind.
3. Unter ökologischen und raumklimatischen Aspekten können nun Bauteilvarianten für die Anwendungen als Boden, Wand und Decke erstellt werden. Die ausgewählte Bauteiloption kann daraufhin den unterschiedlichen **Räumen** und ihren individuellen bauphysikalischen und konstruktiven Anforderungen zugeordnet werden.

4. Im nächsten Schritt werden die Räume bezüglich ihrer raumklimatischen und funktionalen Anforderungen innerhalb der **Gebäudestruktur** untersucht. Die Anordnung der verschiedenen Räume untereinander sowie die Ausgestaltung und Detaillierung der Raumstruktur (z.B. Fassadenöffnung, Dämmstärken etc.) wird durch computergestützte Raumklimasimulationen analysiert und bewertet.

### 3.3 Betrachtungsbereich „historische Baustoffe“

Moderne Hochbauten im Allgemeinen und besonders „Großbauten“, wie öffentlich und viel genutzte Gebäude mit tendenziell hohen (Nutz-)Lastenwirkungen, großen Räumen und Spannweiten sowie daraus resultierende hohen baukonstruktiven und bauphysikalischen Anforderungen, weisen die Tendenz auf, in den meisten Anwendungsbereichen von mineralischen Baustoffen, wie Kalk, Zement und Beton in Kombination mit Stahl und Glas dominiert zu werden. Erdölbasierte und mineralische Dämmstoffe ergänzen das konventionelle Baustoffspektrum. Diese Materialgruppen gehen aufgrund komplexer Wertschöpfungsketten sowie industriell geprägter, energieintensiver Herstellungsprozesse mit hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen einher. Hinzu kommen häufig stark eingeschränkte Recyclingpotenziale und durch den Ressourcenabbau verursachte massive Eingriffe in empfindliche Ökosysteme und Flächennutzungskonflikte.

Um der Klimakrise, einem exzessiven Rohstoffkonsum und der daraus resultierenden Frage eines zukunftsweisenden und umweltfreundlichen Bauens gerecht zu werden, bietet die Betrachtung historischer, traditionsbehafteter und hiesiger Bauweisen, nicht zuletzt inspiriert durch das historische Ausstellungsgut des Freilichtmuseums, wertvolle Lösungsansätze. Die in diesem Kontext verwendeten Materialien, wie u.a. Holz, Stroh und Lehm, bestehen überwiegend aus regionalen, nachwachsenden Rohstoffquellen, liegen in natürlicher Form als (nahezu) „fertiger Baustoff“ vor und sind relativ einfach, handwerklich und in wenigen energiearmen Aufbereitungsschritten für den Einsatz im Gebäude verarbeitbar. Ausgehend vom Einzug der Industrialisierung und der Chemieindustrie im Bauwesen, wurden die meisten bis dahin etablierten Materialien durch klima- und umweltschädliche Massenbaustoffe verdrängt. Erst mit dem Aufkommen eines Bewusstseins für Klima- und Umweltthemen scheint eine zögerliche Rückkehr „historischer“ Baustoffe im kontemporären Bauen stattzufinden. Grundsätzlich führen diese Rohstoffe trotz moderner und teils industrieller Herstellungsprozesse noch heute vielseitige ökologische Potenziale mit sich:

- Regeneration der Rohstoffquellen
- CO<sub>2</sub>-Bindung während Wachstumsphase
- Kurze Wertschöpfungskette und reduzierte Prozessenergie
- Regionalität und reduzierte Transportemissionen
- Hohes Recyclingpotenzial in Form von Wiederverwendung, Kreislauffähigkeit und Kompostierung

Beton nimmt unter den oben genannten Aspekten eine Sonderposition ein, ist jedoch im Kontext moderner Großarchitekturen und für dieses Bauvorhaben im Speziellen, kaum substituierbar und wird daher im Folgenden gezielt auf ein ökologisches Optimierungspotenzial hin untersucht.

### 3.4 Strategie der Bauklimatik und Vorgehensweise

Fast jegliche Entscheidung zur Materialwahl, Ausbildung von Bauteilen, Aufbauten, Vorsatzschalen und Oberflächenfinish, Grundrisszonierung, haustechnischen Regelstrategien und letztlich zur Nutzung hat Einfluss auf das Raumklima. Durch die Optimierung von Gebäuden unter bauklimatischen Gesichtspunkten wird der Fokus ihres energetischen Betriebskonzepts auf passive beziehungsweise quasi-passive Maßnahmen zur Klimatisierung und Belüftung gelenkt. Möglichkeiten der Nutzung natürlicher, kostenloser, lokal vorhandener Ressourcen wie z.B. Sonnenenergie, Tageslicht,

Erdwärme und Frischluft ermöglichen durch Phänomene wie den Glashauseffekt, den thermischen Auftrieb, die Wärmespeicherefähigkeit von Erdreich und Bauteilmasse, windinduzierte Lüftung, den Latentwärmestrom usw. eine Minimierung der aktiven Raumklimatisierung.

Dahingehend beinhalten passive Maßnahmen z. B. die Optimierung der Gebäudehülle, die gezielte Nutzung von Gebäudespeichermassen sowie die Erstellung von außen- und innenklimaabhängigen Lüftungskonzepten etc.

Zur Untersuchung dieser Einflüsse wurden zahlreiche Raumklimasimulationen durchgeführt. Hierzu wurde das Simulationsprogramm Wufi Plus (v.3.2.0.1) verwendet, welches sich von anderen bekannten Simulationstools durch die besondere Berücksichtigung der hygrothermischen Potenziale von Bauteilen und deren Auswirkungen auf das Raumklima auszeichnet, was hinsichtlich der gegebenen Aufgabenstellung im Zusammenhang mit historischen, natürlichen Baustoffen im Museumskontext wichtig ist. In Abhängigkeit von dem Außenklima sowie der Nutzung und der Lüftungs- und Klimatisierungsgegebenheiten wird eine situationsabhängige Quantifizierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse sowohl im Gebäude als auch in den Bauteilen ermöglicht. Damit eignet sich die Software auch zur Berechnung des Energiebedarfs des Gebäudebetriebs. Für die Parameterstudien wurden die Wetterdatensätze (Test-Reference-Year oder Extremwetterperiode) für Kassel, 2004, verwendet.

Das Hauptaugenmerk der Raumklimauntersuchungen in Bericht liegt aufgrund seiner anspruchsvollen Nutzung auf dem Ausstellungsbereich, der gehobenen konservatorischen Anforderungen der ASHRAE –Kategorie A1 genügen soll. Im Rahmen dieser Betrachtungen wurde ein abstrahiertes Modell für den Ausstellungsbereich angenommen.

Für Gebäude, die auf größerer, kompakter Fläche in direktem Kontakt zum Erdreich stehen, kann eine bewusste Reduzierung der wärmeschutztechnischen Maßnahmen bei der Planung erdberührter Bauteile sinnvoll sein. Auf diese Art und Weise kann die Nutzung der thermischen Speicherefähigkeit des Erdreichs als passive, bauklimatische Maßnahme im Sinne eines über das Jahr ausgeglichenen Raumklimas sowie eines energieoptimierten Gebäudebetriebs möglich gemacht werden. Die Fragestellung wird auf der Grundlage einer vorausgehenden, fachlich-wissenschaftlichen Recherche und Voruntersuchung unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen Simulationssoftware betrachtet. Dazu werden unter Berücksichtigung des tatsächlichen Planungsstandes normkonforme, numerische Berechnungen zu den betrachteten thermischen Verhältnissen mithilfe der Simulationssoftware PHYSIBEL VOLTRA durchgeführt, welche das Ziel einer Sensibilitätsanalyse verfolgen.

### **3.5 Bewertungsmatrizen und Ökobilanzierung**

Im Rahmen einer Ökobilanz können einzelne Bauteile, Bauteilaufbauten und Konstruktionskombinationen rechnerisch miteinander zu verglichen werden. Die theoretische Grundlage zur Quantifizierung des Umwelteinflusses liefert die Ökobilanz, deren Anwendung durch DIN 14040 (ff) geregelt ist. Das Prinzip beinhaltet eine Masse-, bzw. Volumenbilanz der zu betrachtenden Bauteile und die Verknüpfung mit masse- oder volumenbasierten ökologischen Kenndaten. Diese Daten werden der Ökobau.dat in der Version von 2019-2020 entnommen. Vereinzelt waren Daten nicht vorhanden und sind durch EPDs ergänzt worden, deren Ausstellungsdatum nicht mehr als 2 Jahre zurück liegen.

Der Betrachtungszeitraum ist für die detaillierte Betrachtung auf 50 Jahre festgesetzt worden. Dabei wird der Austausch von einzelnen Produkten durch Mehrfachzahlung berücksichtigt und in dem Herstellungsaufwand sowie den Treibhauspotenzial dargestellt.



In einer Ökobilanz werden die materialspezifischen ökologischen Bilanzdaten einer Datenbank mit den Baumassen oder die Volumen der geplanten Materialien und Baukonstruktionen in Beziehung gesetzt. Üblicherweise werden die Umwelteinflüsse in verschiedenen Wirkkategorien, z.B. dem spezifischen Primärenergiegehalt (PE n.e. & PE e.), dem Treibhausgas Äquivalentes (GWP) oder dem Eutrophierungs-Potential (EP) dargestellt.

Im vorliegenden Projekt wurde auf der Grundlage der Klimadiskussion und aktueller politischer Ziele entschieden, sich vor allem auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen der verschiedenen Baustoffe und Bauteilkombinationen zu fokussieren- entsprechend wurden die Bilanzwerte des EP und AP ausgeblendet und werden im Folgenden nicht weiter dargestellt.

Dabei wird die Produktion/ der Herstellungsaufwand der Bauteile betrachtet, bis sie den Produktionort verlassen. Nicht oder maximal mit einem wenig transparenten Ansatz enthalten ist der Aufwand/ Transportweg zur Baustelle, da dieser individuell errechnet werden muss. Daten zur Gebäudenutzung können erst in einer nächsten Projektphase Berücksichtigung finden.

Um eine weitere Menge an CO<sub>2</sub> (GWP) und nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch (PE n.e.) einzusparen, sollen die Materialien in diesem Projekt aus der näheren Umgebung von Detmold hergeschafft werden. Hierzu wird ein Einzugsgebiet von ca. 125 Meilen (200 km) definiert, diese Grenze wird als Forschungsauftrag in der zweiten Projektphase gesehen und dort weitreichender behandelt.

Je weiter das Material von der Baustelle entfernt ist, desto höher werden die Werte vom Transport für die Ökobilanz (GWP & PE n.e.), was sich interessanterweise nicht im Preis der Materialien wieder spiegelt bzw. eher reziprok verhält: Aufgrund geringerer Lohn- und Produktnebenkosten sind Waren aus dem Ausland häufig günstiger als die regionalen Produkte.

### **3.6 Energiesysteme und Betrieb**

Die Entwicklung und Analyse von Energiesystemen orientiert sich maßgeblich an den konkreten, aber abstrakt zu erfassenden, Energienutzungen in einem Gebäude oder Quartier. Für die Untersuchung von Energiemanagementsystemen sind zusätzlich Optimierungsvorgaben, Randbedingungen und Nutzervorgaben nötig. Anhand dieser Themen bestimmt sich ebenfalls das Vorgehen in der ersten Forschungsphase, in der das Potenzial eines Energiemanagements gezeigt werden soll.

In einem ersten Schritt werden dazu die Energieflüsse in und aus dem Museum beschrieben. Auch wenn es zu diesem Zeitpunkt noch keine konkreten Werte und Daten für das Museumsgebäude gibt, lassen sich abstrakt die Energieflüsse aufgrund von Erfahrungswerten und Expertenwissen abschätzen und modellieren. Aufgrund der klimatischen Anforderungen ist das thermische System energieintensiv und wird daher in diesem Rahmen als maßgeblich betrachtet. Folgerichtig werden für das Museumsgebäude Heiz- und Kühlkurven modelliert und die resultierenden Energieflüsse mit der geplanten Wärmepumpenanlage betrachtet. Elektrische Verbräuche sind anhand von historischen Leistungsmessungen in das Energieflussmodell integriert und berücksichtigt.

Zur Bewertung des Energieverbrauches, welcher aufgrund der geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen möglichst durch erneuerbare Energiequellen erzeugt werden sollte, wird die deutsche realisierte Energieerzeugung mit den zugehörigen Emissionsfaktoren genutzt. Diese werden zusätzlich verrechnet mit lokaler Energieerzeugung durch Photovoltaik. Dadurch ist es schlussendlich sinnvoll, vornehmlich lokale Solarenergie zu nutzen, und anschließend das Netz möglichst dann zu belasten, wenn der Anteil Erneuerbarer Energien groß ist.

In der dann folgenden Energiemanagementpotenzialanalyse wird die Netzdienlichkeit des Gebäudes und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß in die Überlegungen integriert und anhand eines perfekten thermisch

/elektrischen Energiemanagements die maximale CO<sub>2</sub>-Einsparung bestimmt. Das perfekte Energiemanagement nutzt täglich nur die CO<sub>2</sub>-ärmsten Zeiten, um die thermischen Anforderungen zu erfüllen. Der Vergleich ist dabei eine Standardregelung für Wärmepumpenanlagen, die unabhängig von aktuellen Emissionsfaktoren eine außentemperaturgeführte Regelstrategie verfolgt.

## 4 Material

### 4.1 Primärkonstruktion/Rohbau

#### 4.1.1 Holz



Abbildung 1: Moderne Zangenkonstruktion mit Hartholzdübel  
[Sindre Ellingsen]

Abbildung 2: Traditionelle Holzverbindung: Hakenblatt mit Hartholzdübel  
[<http://smallhouseswoon.com/the-gatehouse/>]

Holz ist ein jahrtausendealter Baustoff. Schon in der Steinzeit errichteten Menschen Pfahlbauten aus Holz. Griechen, Römer und Ägypter nutzten es, soweit vorhanden, für Deckentragwerke (auch schon in mehrgeschossigen Gebäuden) und bis heute existieren in Europa Holzgebäude, wie Fachwerkbauten, aus dem 12. Jahrhundert. Nicht zuletzt durch die industrielle Revolution, neue Anforderungen an den Brandschutz und die rasante Entwicklung von Stahl-, Betonprodukten und Kunststeinen ab etwa 1850 wurde der Holzbau verdrängt, galt als provinziell, minderwertig und mit Nachteilen behaftet. Maßgebend für die Rückkehr zum Holz, insbesondere im industriellen Maßstab, war neben der Entwicklung neuartiger Holzprodukte in den 1960er Jahren, die Einführung von computergestützten Fertigungsmethoden (CNC), die den Holzbau aufgrund der hohen Präzision und Qualität in der Vorfertigung wieder wirtschaftlich und konkurrenzfähig machten. Seit den 1990er Jahren gewinnt der Holzbau zudem unter den Gesichtspunkten von Ökologie, Ökonomie und energieeffizienten Bauen wieder zunehmend an Bedeutung. Angesichts der global drängenden Fragen hinsichtlich des Klimawandels und eines intensiven Ressourcenkonsums der Bauindustrie, bietet Holz aus heutiger Sicht viele Vorteile: Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre, nachwachsender Rohstoff, niedriger Energieaufwand zur Herstellung und Aufbereitung, gute Verfügbarkeit bei nachhaltiger Forstwirtschaft und kurze Transportwege bei heimischen und regionalen verfügbaren Hölzern. Holz ist nicht nur für den Innenausbau geeignet, sondern kann problemlos unter Beachtung des konstruktiven Holzschutzes auch für die Fassade und Außenbauteile eingesetzt werden. Das Naturmaterial kann hierbei nicht nur in seiner gewachsenen Form eingesetzt werden. Durch die Fügung (z.B. im Brettschichtholz) kann der ursprünglich inhomogene Werkstoff homogenisiert werden und

so konstruktiv hochanspruchsvolle Bauaufgaben übernehmen. Je nach Erfordernis kann das Material im Hinblick auf Druck- oder Biegezugfestigkeit (z.B. Binder), Wärmeleitfähigkeit (Holzfaserdämmung) oder Gewichtsersparnis (Fachwerkträger) usw. optimiert werden.

#### **4.1.1.1 Ökobilanz, Kreislauffähigkeit**

Heute sind die Möglichkeiten der Energieeinsparung eines Gebäudes im Betrieb durch die verschiedenen energetischen Standards begrenzt - mit dem Resultat, dass die Herstellungsphase einen größeren Anteil an der Gesamtbilanz eines Gebäudes hat. Entsprechend lohnt es sich, hier den ökologischen Vergleich im Hinblick auf die Herstellungenergie eines Baustoffes oder die bei seiner Produktion freigesetzten Emissionen vorzunehmen.

Holz nimmt unter den betrachteten Primär-Baustoffen (neben Stroh) eine Sonderstellung ein, da es sich um einen nachwachsenden Rohstoff handelt. In den letzten Jahren produzierte die deutsche Holzindustrie knapp über 20 Mio. m<sup>3</sup> Schnittholz, wovon etwa zwei Drittel im Bausektor verarbeitet werden (vgl. Deutschen Säge- und Holzindustrie: 2018). Hierbei ist der energetische Aufwand für die Herstellung gering, anders als z.B. bei Stahl oder Beton, summiert er sich aus Rücken und Sägen, während der Bilanz-Wert für die erneuerbare Energie sehr hoch ist: Er berücksichtigt die im Material gespeicherte Energie, die erst in einem End-of-Life Szenario der thermischen Verwertung wieder freigesetzt wird. Holzbauteile weisen damit eine sehr gute energetische Lebensbilanz auf und fungieren zudem in den hier betrachteten Zeiträumen als CO<sub>2</sub> Speicher, was zu negativen Emissionswerten im GWP-Potential führt. Eine mehrfache Nutzung in neuen Lebenszyklen führt auch hier zu einer verbesserten Energie- und Emissionsbilanz für das Einzelprodukt.

Bei der stofflichen Nachnutzung von Altholz (i.d.R. jedoch noch nicht von Abrissgebäuden) kommt es in der Regel zu einem Downcyclingprozess, bei dem das Produkt stufenweise auf ein niedrigeres Qualitätsniveau herabgesetzt wird (Bsp.: Vollholz – OSB-Platte- MDF-Platte – energetische Verwertung). Eine Kaskadennutzung verfolgt das Ziel, die Holzprodukte möglichst lange auf einem hohen Qualitätsniveau zu halten und große Abwärtsschritte zu vermeiden. Dem gegenüber steht die energetische Verwertung, bei dem Holzabfälle aufgrund ihres hohen Brennwertes verbrannt werden. Dabei wird Kohlenstoff, der in der Wachstumsphase im Holz gespeicherte wurde, in gasförmiger und klimaschädlicher Form freigesetzt. Das Ziel sollte es jedoch sein, den gebundenen Kohlenstoff, durch eine stoffliche Wiederverwendung, möglichst lange zu konservieren, um das Treibhausgas langfristig der Atmosphäre zu entziehen.

#### **4.1.1.2 Funktionalität**

Der Baustoff Holz stellte als Primärkonstruktion von großmaßstäblichen Gebäuden lange Zeit eine Ausnahme dar. Dies hing einerseits mit den durch Stammwuchs eingeschränkten Dimensionen des Vollholzprodukts und somit mit beschränkten Spannweiten und unökonomischem Materialaufwand zusammen, andererseits mit Schwierigkeiten im Bereich des Brandschutzes, der Dauerhaftigkeit und der Bauphysik. Auch im Bereich des Ausbaus als Dämmstoff und Bekleidungswerkstoff wurde Holz durch leistungsfähigere und wirtschaftlichere abiotische Industrieabstoffe verdrängt.

Die Entwicklung neuer Produkte dank optimierter Fertigungsmöglichkeiten in Verbindung mit einem digitalen Planungsprozess schaffen hier neue Potenziale. Die Homogenisierung der technischen Eigenschaften des Rohstoffs und die Loslösung von dimensional Grenzen sind die essenziellen Optimierungen, die industrielle Massivholzbaustoffe wieder konkurrenzfähig machen. Die immer höhere Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht, sowie die diversen Einsatzmöglichkeiten und herstellbaren Formen von Holzzeugnissen überzeugen nun auch im Großbaukontext. Eine

Vorfertigung im Werk und schnelle Montage vor Ort kann die Konstruktion wirtschaftlich und unkompliziert machen (vgl. Kap. 1.1.5ff).

Insbesondere im Bereich des Brandschutzes helfen moderne Berechnungsverfahren von Abbrandraten, die Nachteile in puncto Brennbarkeit des Ausgangsmaterials zu egalisieren. Auch bei der Dauerhaftigkeit und dem Feuchteschutz können Holzbauten aus Vollholz, aber auch in Form von Leimholz, unter Beachtung des konstruktiven Holzschutzes (vgl. DIN 68 800-2) eine ähnlich hohe Referenznutzungsdauer wie mineralische Massivbaustoffe aufweisen.

Museumsbauten haben zum konservatorischen Schutz der Kunst- und Ausstellungsstücke, hohe Anforderungen an ein konstantes Raumklima. Diesbezüglich führt die Holz-Leichtbauweise, welche im Kontext von Großbauten üblich ist, zunächst Nachteile durch eine geringere Wärmespeicherfähigkeit und somit eine Tendenz zu raumklimatischen Schwankungen im Vergleich zu einem Massivbau mit sich. Hier sind kompensierende Maßnahmen erforderlich, um die Wärmespeicherfähigkeit der Konstruktion zu erhöhen. Im Rahmen der zweiten Forschungsphase soll seitens der TH OWL mittels computergestützter Simulation untersucht werden, inwiefern hybride Bauweisen (leichte Holzkonstruktionen und massive Bauteile) ein gleichbleibendes Raumklima gewährleisten können. Auch der Zeitgeist gibt durch die gesellschaftliche Debatte über umwelt- und klimagerechtes Bauen wieder Raum für den natürlichen Baustoff und rückt ihn in den Fokus des architektonischen Kontextes. Der Typus des Museumsbaus eignet sich hierfür in Anbetracht seiner Öffentlichkeitswirkung und didaktischen Aufgabe in besonderem Maß. Die Ressource Holz und Holzkonstruktionen stellen außerdem im vorliegenden Fall einen direkten Ortsbezug zu den im Freilichtmuseum ausgestellten historischen Fachwerkbauten her und bieten das Potenzial, diese traditionellen Konstruktionsweisen auf einen modernen Holzbau zu übertragen. Neben dem Einsatz von Holz als Tragwerk, kann es auch als Raumabschluss, Verkleidung und Dämmstoff zum Einsatz kommen.

#### **4.1.1.3 Regionalität**

Die jahrhundertealte Tradition des Baustoffes Holz ist durch die landesweite Verfügbarkeit des Materials in heimischen Wäldern begründet. In der näheren Detmolder Umgebung befinden sich zwei bedeutsame Zentren der Holzertschöpfung (Säge- und Holzwerkstoffindustrie). Die Stadt selbst befindet sich in der Region Ostwestfalen-Lippe, welche ca. 150.000 ha Waldfläche (16% der Waldfläche in NRW) und ca. 19% der landesweiten Holzvorräte (359m<sup>3</sup>/ha) umfasst. In dieser Region dominieren Buchenbestände mit ca. 31% des Waldvorkommens. Das Waldvorkommen in Südwestfalen (Sauerland), welches sich größten Teils im 200km-Radius befindet, umfasst ca. 310.000ha Waldfläche und stellt das größte Waldvorkommen in NRW dar. In dieser Region wachsen zu ca. 60% Fichten. Die Region gilt als Zentrum der Sägeindustrie in NRW und beherbergt Produktionsstandorte für Tragwerkselemente für KVH, BSH, FSH und Duo- und Triobalken (Fichtenholz) sowie Holzwerkstoffprodukte, wie OSB- und Holzfasertplatten. Laut der Informationen seitens „Wald und Holz NRW“ können Sondersortimente aus Laub- und Nadelholz, wie Eiche und Lärche, bei Bedarf in regionalen Sägewerken bereitgestellt werden, was besonders für die Anwendung im Bereich der Fassadenbekleidung interessant ist (vgl. Anhang A1. 1.1.9).

## 4.1.2 Beton



Abbildung 3: Hohlkörper in Betondecke [Heinze Cobiax Deutschland GmbH.]

Abbildung 4: Opus caementicium, Pantheon (128 n. Chr.), Rom  
[[https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/baustoff-beton-geschichte/.](https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/baustoff-beton-geschichte/)]

Die Anfänge der Entwicklung des Baustoffs Beton beginnen mit der Verwendung von Kalkmörtel im Altertum. Die Römer entwickelten den Mörtel weiter und erfanden durch die Kombination von Puzzolanen, Ziegelmehl, Sand, gebranntem Kalk sowie Natur- oder Ziegelstein den ersten Beton: opus caementicium. Mit dem Zerfall des römischen Reiches ging auch ihr bautechnisches Wissen verloren. Mit der Patentierung des Portlandzementes im Jahr 1824 von Joseph Aspdin, der entscheidenden Weiterentwicklung durch die Erhöhung der Brenntemperaturen 1844 durch Isaac Charles Johnson und der Kombination mit einem Eisengeflecht seitens des Franzosen Joseph Monier im Jahr 1849, wird das moderne (Stahl-)Betonzeitalter eingeleitet. Spätestens nach dem zweiten Weltkrieg setzt sich weltweit und im großen Maßstab der Baustil der Moderne und damit das Bauen mit Beton durch. Die Gründe dafür liegen auf der Hand: Beton kann im plastischen Zustand in nahezu jede Form gegossen werden, ist hoch druckfest und kann in Kombination mit Zuelementen aus Stahl oder anderen geeigneten Materialien große Spannweiten relativ problemlos überspannen. Er ist chemisch widerstandsfähig, selbst nicht brennbar und bietet im Brandfall einen guten Schutz durch einen hohen Feuerwiderstand. Der Oberflächengestaltung sind nahezu keine Grenzen gesetzt. Zudem ist Beton aufgrund seiner einfachen Materialzusammensetzung und einfachen Verarbeitbarkeit relativ günstig. Entsprechend wurden in Deutschland 2017 bei Nichtwohngebäuden 57% des umbauten Raums in Stahlbeton realisiert. Abgesehen von dem Bereich des landwirtschaftlichen Bauens ist Stahlbeton in allen Bereichen der am meisten verwendete Baustoff. Die Einsatzgebiete reichen von der Bodenplatte und erdberührten Bauteilen bis hin zu Decken- und Dachkonstruktionen. Beton lässt sich aufgrund seiner Materialeigenschaften sowohl innen als auch außen einsetzen.

Das Image von Beton hat jedoch zwei Seiten: moderne Architektur auf der einen Seite und graue, monotone Plattenbauten auf der anderen. In jüngerer Geschichte ist ein weiterer negativer Aspekt hinzugekommen: die Betonproduktion belastet das Klima und verursacht durch den Ressourcenabbau (u.a. Sand und Kies) schwerwiegende Umweltschäden (vgl. Anhang A1. 1.2.7). Um dieses Problem zu lösen, suchen Experten Wege, das Material klimafreundlicher und ressourcenschonender zu machen. Dies kann beispielsweise durch die Anwendung eines CO<sub>2</sub>-reduzierten Öko-Zements und zum anderen durch eine Masse-reduzierte Bauweise, wie Hohlkörperdecken, sowie durch den Einsatz von Rezyklaten (Bruchsand oder Schotter) oder Wüstensand erreicht werden (vgl. Anhang. A1 1.2.8).

#### 4.1.2.1 Recycling / Kreislauffähigkeit

Beton ist ein Komposit-Material, das aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt ist: Außer dem Zement als Bindemittel werden Gesteinsfraktionen in unterschiedlichen Körnungen, Wasser und ggf. Zusatzstoffe und -mittel (Verzögerer, Verflüssiger usw.) zur Herstellung benötigt. Entsprechend sind es die Umwelteingriffe durch den reinen Ressourcenabbau, vor allem jedoch die CO<sub>2</sub> Emission während der Herstellung des Bindemittels, die eine aktuelle Klimadebatte um den Baustoff Stahlbeton auslösen:

In Deutschland wurden 2018 insgesamt 33.6 Mio.t Zement hergestellt. Hierbei wurden ca. 28,8 Mio t CO<sub>2</sub> freigesetzt, von denen ca. 55-60% chemisch bzw. materialbedingt sind: Im Rahmen des Brennvorganges wird bei der Entsäuerung des Kalksteins CO<sub>2</sub> emittiert, um die gewünschten Zementklinker zu erhalten. Die übrigen 45-40% der Emission entstehen energiebedingt, um die erforderlichen Temperaturen von 1450 °C im Drehbrennofen zu erreichen. Dabei werden in Deutschland durchaus alternative Brennstoffe eingesetzt, die den Einsatz fossiler Brennstoffe substituieren sollen – wobei es aber kritisch hinterfragt werden muss, ob Altreifen oder die Verbrennung des Erdölproduktes Kunststoff hier tatsächlich als Alternativen gezählt werden dürfen (vgl. Daten nach VDZ18). Der Zement für einen Kubikmeter Beton verursacht so zwischen 190 und 270 kg CO<sub>2</sub>- Äquivalent (je nach angestrebter Qualität). Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit (Portland-)zementreduzierten Zementrezepturen oder grundsätzlich alternativen Bindemitteln.

Damit nicht genug: tatsächlich ist ja die Rede von Stahlbeton und auch der notwendige Bewehrungsstahl hat einen großen ökologischen Fußabdruck. Ausgehend von einem Volumenprozent von 1% Bewehrungsstahl ergeben sich für den Kubikmeter Stahlbeton mind. ca. weitere 110 kg CO<sub>2</sub>-eq pro Kubikmeter Stahlbeton. Hiervon sind 90% energiebedingt, resultieren also aus dem Herstellungsaufwand.

Alternativen zu Stahl sind mit Carbon oder Glasfasern in Sicht, aber diese sind maximal langfristig in der Lage, die Bewehrungsstähle zu ersetzen. Da auch die chemischen Reaktionen in Kombination mit Ökobetonen noch nicht erforscht sind, wird die Substitution des Bewehrungsstahles im vorliegenden Projekt nicht weiterverfolgt.

Von großem Interesse ist jedoch die Nutzung von Beton-Rezyklat als Zuschlag für die notwendigen Betonbauteile. Kreislaufgerechtes Betonrecycling bedeutet nach dem aktuellen Stand der Technik, Abbruchbeton zu zerkleinern, zu klassieren und den gewonnen Betonsplitt als partiellen Ersatz für die Gesteinskörnung aus primärer Rohstoffquelle (Naturkies und Schotter) zu ersetzen. Der Einsatz von Gesteinskörnung aus einer Beton-Recycling-Quelle für Frischbeton liegt in Deutschland aktuell jedoch lediglich bei ca. 0,5% (vgl. HRRS18: 70). In der Regel kommt es zum Downcycling in den Anwendungen im Straßenbau, als Füllmaterial und Frostschutzschichten. Um Beton-Rezyklat möglichst rohstoffeffizient nutzen zu können, verfolgt die Forschung das Ziel, die Betonmatrix in seine Bestandteile Zementstein und runden Kies zu zerlegen. Dies gelang bereits in aufwendigen Versuchen durch eine elektrodynamische und elektrohydraulische Fragmentierung. Die Umsetzung dieser Technik im großen Maßstab ist in naher Zukunft jedoch nicht zu erwarten (vgl. HRRS18: 70). Darüber hinaus zeigen weitere Untersuchungen, dass die feinen Kornfraktionen (Betonbrechsand), die einen großen Teil des Betonrecyclings ausmachen und lange für die Produktion von Frischbeton als unbrauchbar galten, als Sekundärrohstoff der Zementproduktion zurückgeführt werden kann. Das Bindemittel Zement und Zusatzstoffe sind nicht durch Rezyklate aus Betonbruch zu ersetzen. Das bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Bilanz von RC-Beton, der maßgeblich durch den energieintensiven Zementanteil beeinflusst wird, nicht zwingend besser ausfällt, dafür jedoch primäre Rohstoffquellen geschont werden können (vgl. Anhang A.3 1.2.8).

#### 4.1.2.2 Funktionalität

(Stahl-)Beton eignet sich aufgrund seiner hohen Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Wertigkeit besonders für den Einsatz in Großbauten, die aufgrund von hohen Nutzlasten und tendenziell großen Raumtiefen sowie hohe bauphysikalische und konstruktive Anforderungen aufweisen. Im Kontext einer musealen Nutzung bietet das Material aufgrund seiner hohen Wärmespeicherfähigkeit den Vorteil, Temperaturspitzen ausgleichen zu können, indem überschüssige Wärme „zwischengespeichert“ und zeitversetzt wieder abgeben wird, bevor es zu einer Überhitzung oder Auskühlung im Innenraum kommt. Darüber hinaus findet Stahlbeton bei erdberührten und gleichzeitig hoch belasteten Gebäudeteilen aufgrund der Feuchteresistenz u.a. als wasserundurchlässiger-Beton Anwendung. Aufgrund der Eigenschaft nicht brennbar zu sein, kommt Beton für Bauaufgaben, wie Brandschutzwände, Treppenkonstruktionen und Treppenhaus- und Aufzugsschachtwände zum Einsatz. Museums- und Ausstellungsräume haben häufig die Anforderung, sich in der architektonischen Gestaltung zurückzunehmen, um so einen möglichst neutralen Raum für die Ausstellungsstücke zu schaffen. In diesem Rahmen sind die material- und konstruktionstypischen Eigenschaften von Beton von Vorteil: ein nahtloser Übergang von vertikalen und horizontalen Bauteilen und eine einheitliche und neutrale Oberflächenqualität. Das Material Beton soll aufgrund der negativen Auswirkungen auf Klima und Umwelt, in diesem Bauvorhaben, nicht in der konventionellen Materialrezeptur zusammengestellt werden. Eine Verbesserung der Ökobilanz soll durch den Einsatz eines CO<sub>2</sub>-reduzierten Zements, eine Masse-reduzierte Bauweise, wie mit der Konstruktionsweise von Hohlkammerdecken, Recycling-Kies und Sand erreicht werden (vgl. Anhang A1. 1.2.8ff). Eine neuartige Betonrezeptur bietet das Potenzial, wenn auch nicht von außen ablesbar, den Innovationgedanken des Museums zu repräsentieren und einen zukunftsweisenden Umgang mit Beton aufzuweisen

#### 4.1.2.3 Regionalität

Die Verfügbarkeit von Zement und Zuschlägen in der näheren Detmolder Umgebung ist mit Zementwerken in Paderborn oder Geseke definitiv vorhanden. Gleiches gilt für Zuschlagstoffe, die aus den glazialen Sedimenten und dem Geschiebemergel am Rand des Teutoburger-Waldes in zahlreichen Sand- und Kiesgruben gewonnen werden. Die regionale Verfügbarkeit von Stahl für die Bewehrung konnte in der ersten Phase des Projektes noch nicht vollständig überprüft und ermittelt werden (*Circle 200*). Dies und/oder die Verwendung von Recycling-Baustoffen (Stahl oder rezyklierte Zuschläge) und auch die detaillierte Prüfung der o.g. Betonbaustoffe wird aktuell als Forschungsauftrag in der zweiten Projektphase gesehen.

#### 4.1.3 Lehm



Abbildung 5: Gefach mit Lehm [<https://www.faz.net/asv/waermedaemmung/von-lehm-und-stroh-zum-modernen-daemmstoff-16692195.html>.]



Abbildung 6: Vorgefertigte Stampflehmblöcke [Herzog de Meuron/Martin Rauch]

Lehm ist ein natürlicher Baustoff, der durch Zersetzung von Urgestein entsteht. Er besteht aus Sand und Schluff sowie Ton, welcher für die Bindefähigkeit verantwortlich ist. Zu geringeren Teilen können auch Kies und Steine enthalten sein. Lehm ist im plastischen Zustand formbar und im trockenen Zustand fest. Die Erhärtung von Lehm findet rein physikalisch statt und ist, anders als beispielsweise bei Zement, durch die Zugabe von Wasser, reversibel.

Das Naturmaterial weist global eine hohe Verfügbarkeit auf und kann einfach abgebaut und verarbeitet werden, weswegen es bereits seit etwa 10.000 Jahren als Baustoff Verwendung findet und bis heute in vielen Kulturkreisen einen der wichtigsten Baustoffe darstellt. Das Bauen mit Lehm blickt in Deutschland mit der Anwendung in Fachwerkbauten (Strohlehm) und tragendem Stampf- und Wellerlehm-bauten auf eine lange Tradition zurück. Jedoch verlor Lehm, ähnlich wie Holz, im Rahmen der Industrialisierung seine Bedeutung und erfährt erst seit einigen Jahrzehnten aufgrund seiner ökologischen Vorzüge eine Renaissance (vgl. Anhang A1. 1.3.2).

Verarbeiteter Lehm ist schadstofffrei und bietet eine besondere Speicher- und Regulierungsfähigkeit von Wärme und Feuchte mit positiver Wirkung für das Raumklima. Darüber hinaus ist der Produktions- sowie der Montageprozess in der Regel mit geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden.

Wohingegen die Aufbereitung und Verarbeitung im traditionellen Lehm-bau auf dem Einsatz von Muskelkraft von Mensch und Tier basierte, kommen heute Maschinen und moderne Herstellungsmethoden (werkseitige Vorfertigung) zum Einsatz. Die zeitgenössischen Lehm-bautechniken setzen sich aus Stampflehm, Lehmsteinen, Lehmplatten und Lehmputz zusammen (vgl. Anhang A1. 1.3.4 u. A1. 1.3.7).

Die Eigenschaften des Materials können entsprechend des Anwendungsgebiets durch die Zugabe von Zusatzmitteln und -stoffen angepasst werden. Beispielsweise erhöhen chemisch abbindende Zusätze die Belastbarkeit des Gefüges, schränken jedoch ein hochwertiges Recycling ein (vgl. Anhang A1. 1.3.6). Lehm kann im Innen- wie auch, unter Berücksichtigung eines Witterungsschutzes, im Außenbereich, sowie als tragendes und nicht tragendes Bauteil eingesetzt werden.

#### **4.1.3.1 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Der Baustoff Lehm erfüllt die Vorgaben der Nachhaltigkeit in vielerlei Hinsicht. Seine Herstellung ist extrem unaufwendig: in Deutschland wird er im Tagebau/ in Gruben maschinell abgebaut und je nach Erfordernis unter Zugabe von Wasser, Gesteinsmehl und ggf. Naturfasern (z.B. Stroh) zu einem Bauprodukt verarbeitet. Reste aus der Produktion können entweder dem Produktionskreislauf erneut zugeführt oder der Natur zurückgegeben werden. Weder während der Herstellung noch in der Verarbeitung werden schädliche Substanzen benötigt, so dass auch das eingebaute Material jederzeit wiedereingesetzt oder zurückgeführt werden kann.

Dies ist möglich, da der erhärtete Lehm in seiner reinen Form unter der Zugabe von Wasser replastifiziert und ohne Qualitätsverlust recycelt werden kann. Durch ein Aufschwämmen werden die Kapillarkraftbindungen zwischen den verschiedengroßen Korngrößen aufgelöst und das Grobkorn von den tonhaltigen Agglomeraten, dem Bindemittel, getrennt. Dadurch wird zudem ermöglicht, dass sich der Lehm rückstandslos von anderen Bau- und Störstoffen, wie beispielsweise Beton lösen lässt. So kann das Material ohne großen Energieaufwand wiederverwendet oder wieder Teil des Bodens werden, aus dem der Lehm entnommen wurde. Aus diesen Gründen sollte Lehm möglichst nicht mit chemischen Zusatzmitteln, wie hydraulische Bindemittel, vermischt werden. (vgl. Anhang A1. 1.3.9)



#### 4.1.3.2 Funktionalität

Dank seiner verlustfreien Rezyklierbarkeit und der einfachen Gewinnung ist Lehm ein Symbol für umweltfreundliches Bauen. Damit ist das Erdmaterial besonders prädestiniert, den innovativen und zukunftsweisenden Charakter des Neubaus hervorzuheben.

Für die Herstellung der Lehmbauteile im Museumsneubau, bietet der potenziell lehmhaltige Anteil des Baugrubenaushubs die Möglichkeit als Rohmaterial getrennt und vom lokalen Lehmbaustoffhersteller aufbereitet zu werden. Durch das Recycling werden transportbedingte Emissionen reduziert und primäre Rohstoffquellen geschont.

Die Verwendung von Lehm stellt gleichermaßen, wie Holz, eine konkrete Verbindung zu den ortsprägenden Fachwerkbauten, deren Gefache mit Strohlehm ausgebildet sind, her und knüpft an das historische Erbe des regionalen Lehmbaus an. Lehmbaustoffe können aufgrund ihrer flexiblen Formgebung und unterschiedlicher bauphysikalischer Eigenschaften vielfältig eingesetzt werden. Dank der hohen Rohdichte von gepresstem Lehm (1700 – 2200 kg/m<sup>3</sup>), kann das Material als tragende Wand und mit entsprechender Oberflächenbehandlung auch als belastbarer Fußboden ausgeführt werden. Nichttragende Wände oder Beplankungen in Form von Plattenwerkstoffen können aus Leichtlehmprodukten hergestellt werden. Mit dem Einsatz von Lehm im Innenraum trägt das Material durch seine hygri-schen und thermischen Eigenschaften einen wertvollen Beitrag zur Regulierung und Stabilisierung der raumklimatischen Bedingungen im Museumsbau bei. Durch aufgeraute Oberflächen kann Stampflehm außerdem schallschutztechnische Aufgaben übernehmen (vgl. Anhang A1. 1.3.3.f).

#### 4.1.3.3 Regionalität

Die Verfügbarkeit von Lehmstoffen in der näheren Umgebung Detmolds sowie das Vorkommen von Rohlehm auf dem Baugrundstück wurde noch nicht abschließend untersucht. Durch die Nähe der Firma Conluto, Blomberg, konnte jedoch in der ersten Phase ein Lieferant und Hersteller identifiziert werden, der eine regionale Produktion wahrscheinlich macht. Dies und vor allem die tatsächlichen Produktionsabläufe sollte als Forschungsauftrag in der zweiten Projektphase bearbeitet werden.

## 4.2 Ausbaustoffe

### 4.2.1 Dämmstoffe



Abbildung 7: Nachbau einer gedämmten Wand aus der Bronzezeit  
[<https://lh.hessen.de/umwelt/biorohstoffnutzung/stoffliche-nutzung/lehm-ein-nachhaltiger-baustoff/>]

Abbildung 8: Gefachdämmung aus Baustroh  
[<https://www.naturbaustoffe-traud.de/natuerliche-daemmstoffe/stroh/>]

Schon in der Bronzezeit wurden Dächer mit getrockneten Gräsern gedeckt und Wandkonstruktionen, bestehend aus einem zweischaligen, mit Lehm beworfenen Flechtwerk aus Zweigen und Ästen und einer dichten Füllung aus getrocknetem Gras, erbaut. Dieser Wandaufbau wurde im Laufe der Zeit (typischerweise) zunächst durch eine massive Blockholz-, später eine Fachwerk- und im Rahmen der Industrialisierung durch eine 38cm starke Ziegelwand abgelöst. Das Material der Konstruktion stellte gleichzeitig den Dämmstoff dar, wobei ein Verständnis für konstruktionsbedingte Wärmeverluste lange Zeit nicht existierte. Das ändert sich durch die Energiekrise in den 1970er Jahren und dem aufkommenden Bewusstsein für Klima- und Umweltfragen (vgl. Anhang A1. 2.1.2). Mit Blick auf die Klimaziele der Bundesregierung, ist der Einsatz von großen Mengen von Dämmstoffen zukünftig absehbar. Der Dämmstoffmarkt wird von mineralischen und erdölbasierten Dämmmaterialien (z.B. EPS, XPS, PUR und Mineralwolle) dominiert. Diskussionen um die Endlichkeit fossiler Ressourcen und den Klimawandel führen jedoch zu einer Rückbesinnung auf traditionsbehaftete Dämmstoffe wie Schilf, Wiesengras, Stroh oder Schafswolle. Heute wird das Materialspektrum um Recyclingprodukte, aus Zellulose (Altpapier), Holzspäne und Flachfasern erweitert. Holzwolle- und Holzfaserprodukte weisen heute den größten Marktanteil biotischer Dämmstoffe auf (vgl. Anhang A1. 2.1.9).

Neben den ökologischen Vorteilen in Bezug auf Herstellungsenergie, Emissionen und Ressourcenverbrauch, sind es die natürlichen Materialeigenschaften, die den Einsatz dieser Dämmstoffe attraktiv machen. Ähnlich wie Holz oder Lehm können natürlichen Dämmstoffe verhältnismäßig große Mengen an Feuchtigkeit zwischenpuffern, ohne dass sich die Materialfeuchte signifikant erhöht und die Dämmleistung abnimmt. Darüber weisen biotische Dämmstoffe keinen oder einen sehr geringen Schadstoffanteil auf und können unter Aspekten der Wärmeleitfähigkeit nahezu gleichwertig wie konventionelle Dämmstoffe eingesetzt werden. Bei fachtechnisch korrektem Einbau stellen sie kein erhöhtes Risiko im Brandfall dar, da die meisten biotischen Materialien der Baustoffklasse B2, normal entflammbar (wie z.B. EPS) oder B1, schwer entflammbar, zugeordnet werden können. Im Vergleich zu erdölbasierten Dämmstoffen besteht im Brandfall zudem der Vorteil, dass sie nicht brennend tropfen und die entstehenden Rauchgase deutlich weniger toxisch sind (vgl. Anhang A1. 2.1.7).

Wiederum sind biotische Dämmstoffe meist mit höheren Materialkosten verbunden und für Anwendungsbereiche mit erhöhten Brandschutzanforderungen (Baustoffklasse A) nicht geeignet. Auch die Fähigkeit der Feuchteaufnahme ist begrenzt, sodass biotische Dämmstoffe für Anwendungen, in dauerhaft feuchten Bereichen (z.B. Perimeterdämmung) nicht geeignet sind.

In Form von Matten, Dämmplatten, Einblasdämmung oder Stopfdämmung bieten biotische Dämmstoffe vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.

#### **4.2.1.1 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Der Markt an Dämmstoffen ist groß, eine schnelle Übersicht ist hier kaum zu leisten. Eine ausführlichere Darstellung verschiedener Dämmstoffe in den Kategorien mineralischer, fossiler, amino- und duroplastischer sowie biogener Dämmstoffe wird im Anhang in den Potentialen PE<sub>ne</sub>, PE<sub>e</sub> und GWP vorgenommen. Ohnehin soll im vorliegenden Projekt auf konventionelle Dämmstoffe eher verzichtet werden, so dass hier der Blick auf einige ausgewählte nachwachsende Dämmstoffe gelenkt werden kann.

Daher ist hier vor allem das Stroh als recht junger Baustoff zu nennen, welcher erst 2014 (wieder) eine offizielle Zulassung als Wärmedämmstoff durch das DIBT erhalten hat. Das Material ist mit einer Wärmeleitfähigkeit eines normalgepressten Strohballens zwischen 0,04 und 0,05 W/mK voll-

ständig konkurrenzfähig zu anderen Dämmstoffen. Aktuell richten sich die Dimensionen an den gängigen Ballenpressen der Landwirtschaft aus; das Produkt ist prinzipiell ein „Abfall“ des konventionellen Getreideanbaus.

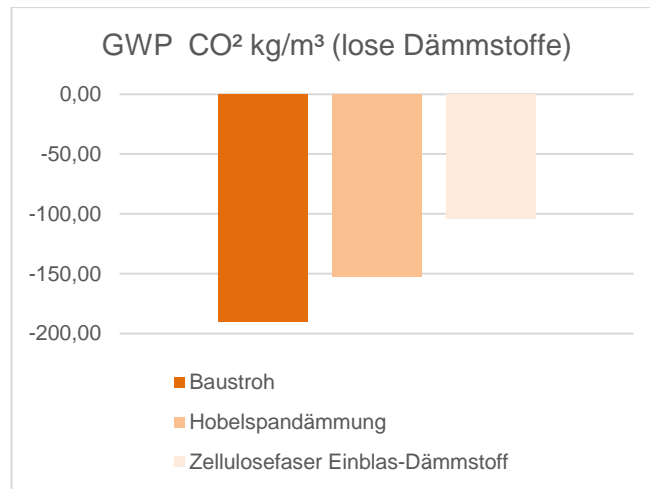


Abbildung 9: Vergleich des Global-Warming-Potentials für Stroh, Holzspäne und Zellulosedämmung

Im Vergleich zu anderen nachwachsenden, losen Dämmstoffen wie Hobelspandämmung oder Zellulose-Einblasdämmung weist Baustroh das höchste Potential zur CO<sub>2</sub>-Einsparung bzw. -Einspeicherung auf. Dies liegt auch an den wenigen und wenig aufwendigen Verarbeitungsschritten des in seiner Verwendung naturbelassenen Materials. Der Aufbau eines Strohhalmes an sich bietet durch die vorhandene Struktur seiner Zellkammern eine effiziente technologielose Dämmwirkung.

Allein in Deutschland werden jedes Jahr 12 Mio. Tonnen Weizen produziert. Die Stängel sind also als Material in einem äußerst hohen Maß vorhanden, wenn es denn verwendet würde.

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die naturbelassen und chemisch unbehandelt sind, können auf natürlichem Wege kompostiert und biologisch abgebaut werden. Chemische Zusätze insbesondere Flammhemmer erschweren diese Art der Nachnutzung und sollten daher vermieden werden. In der Regel kommt es aufgrund eines hohen Heizwerts zur thermischen Verwertung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffquellen. Eine direkte Wiederverwendung von ungebundenen biotischen Dämmstoffen, wie Zellulose-Flocken und Granulat, ist theoretisch durch das Absaugen aus den Hohlräumen problemlos möglich.

#### 4.2.1.2 Funktionalität

In energieeffizienten Gebäuden und besonders in Großbauten macht die Gebäudedämmung einen nicht unerheblichen Teil des verbauten Volumens aus. Die Substitution von mineralischen und fossilen naturbasierten Dämmstoffen trägt aufgrund der nachwachsenden Rohstoffquellen sowie potenziell geringem Prozessenergieeinsatz zu einem günstigen ökologischen Fußabdruck des Gebäudes bei. Gedämmte Gebäudehüllen verhindern Wärmeverluste, die Entstehung von Tauwasseranfall und tragen so zur Stabilisierung des Raumklimas bei, was aufgrund von konservatorischen Anforderungen im musealen Kontext zum Erhalt klimatisch sensibler Ausstellungsstücke von besonderer Bedeutung ist. Im Gegensatz zu erdölbasierten Massendämmstoffen wirken biotische Dämmmaterialien aufgrund ihrer hohen Dichte und Wärmespeicherfähigkeit, tageszeitlichen Temperaturschwankungen, bedingt durch Besucherströme und solare Erträge, entgegen. Dadurch kann die nachteilhafte Eigenschaft der begrenzten Speichermasse einer Leichtbauweise zum Teil kompensiert werden. Auch die Fähigkeit Feuchtigkeit zu speichern ist ein großer positiver Effekt für das anspruchsvolle Raumklima im Museumsbau.

#### 4.2.1.3 Regionalität

Dämmstoffe aus nachwachsenden Pflanzenfasern, wie Stroh, Schilfrohr, Gräser und Holz, haben in Europa eine lange Tradition, da sie zu den hiesigen Pflanzenarten gehören und damit in natürlicher Form regional verfügbar waren oder als Nebenprodukt in der Landwirtschaft anfielen und relativ einfach und energiearm verarbeitbar waren. Trotz des potenziellen Vorkommens der verschiedenen Rohmaterialien (z.B. Holzzeugnisse, Gräser, Altpapier) gibt es nur wenige großmaßstäbliche Produktionsstandorte in Deutschland. Zum aktuellen Stand der Forschung und laut der Angaben seitens der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), wird die regionale Verfügbarkeit der meisten biotischen Dämmstoffe nicht gegeben sein. Darüber hinaus setzt ein deutscher Produktionsstandort nicht zwingend die Verwendung von regionalen Rohstoffen voraus. Dies muss im Einzelfall und produktspezifisch recherchiert werden. Baustroh stellt als landwirtschaftliches Nebenerzeugnis der Getreideproduktion eine Ausnahme dar. Strohballen können mittels mobiler Aufbereitungsanlagen am Ort der Entstehung hergestellt und direkt eingebaut werden. Hiesige Baustroh-Lager befinden sich in Hannover und Paderborn. Die Anbaubedingungen für Hanf und Flachs sind hier zu Lande für Landwirte hingegen unattraktiv. Rohstoffquellen wie die Korkeiche, Jutepflanze und Kokospalme zählen ohnehin nicht zu den regionalen Pflanzenarten. Schafswolle ist dagegen theoretisch ebenfalls regional verfügbar. Hier ist die ausreichende Verfügbarkeit für den großmaßstäblichen Einsatz im Museumsbau jedoch fraglich.

#### 4.2.2 Bekleidungen / Beplankungen



Abbildung 10: Naturstein als Fußbodenbelag [NGR Natursteingesellschaft mbH]

Abbildung 11: Lehm- oder Strohbauplatte [Götz Baustoff- und Renovierungszentrum]

In den seltensten Fällen ist die tragende Struktur eines Gebäudes auch die sichtbare Oberfläche. Fassade, Innenwand und Decke werden zumeist beplankt oder verkleidet, nicht nur aus gestalterischen Gründen, sondern auch um bauteilspezifische, konstruktive und bauphysikalische Anforderungen erfüllen zu können. Seit den Anfängen des Bauens nutzten Menschen die lokal verfügbaren Ressourcen, wie Holz, Lehm, Stroh und Naturstein, um Gebäude von außen wie von innen auszukleiden. Wie in allen anderen Bereichen des Bauens auch, explodierte das Angebot an Produkten mit der Industrialisierung, Automatisierung und Globalisierung. Die wirtschaftliche Motivation verlagerte den Materialschwerpunkt von natürlichen und stoffreinen zu artifiziellen und Kompositmaterialien.

Bei der Betrachtung von Fassadenbekleidungen zeitgenössischer Museumsbauten, fällt auf, dass Holz als charakter- und gestaltprägendes Material, eher eine untergeordnete Rolle spielt und lediglich partiell zum Einsatz kommt. In diesem Anwendungsfeld scheinen Fassadenkonstruktion aus überwiegend (energieintensiven) mineralischen Materialien oder Metall in Kombination mit Glas zu

dominieren. Dies kann neben individuellen gestalterischen Vorzügen unter anderem auf die bauphysikalischen Vorteile, wie eine hohe Langlebigkeit, Witterungsbeständigkeit und Nichtbrennbarkeit zurückgeführt werden (vgl. Anhang A1. 2.2.2).

Die Innenraumbekleidung wird in der Regel von flächigen und farblich einheitlichen Raumbekleidungen geprägt, sodass ein möglichst neutraler und in seiner Wirkung „zurückhaltender“ Raum entsteht, indem die Aufmerksamkeit des Nutzers uneingeschränkt auf das Ausstellungsgut gerichtet ist. Dazu sind Putzaufträge auf massiven Wandkonstruktionen oder Anstriche (Verspachtelungen) von Trockenbaukonstruktionen aus gestalterischen, aber auch ökonomischen Aspekten besonders geeignet. Baustoffe wie Holz oder Lehm, die im sichtbaren Bereich eingesetzt werden, erfüllen aufgrund der heterogenen und charakteristischen Oberflächeneigenschaften häufig nicht die Anforderungen an einen neutralen Raumeindruck und finden im konventionellen Museumsbau selten Anwendung (vgl. Anhang A1. 2.2.3f).

Die architektonisch gestalterischen Anforderungen an den Oberbodenbelag liegen ähnlich wie bei der Innenraumbekleidung bei der Ausbildung neutraler und zurückhaltender Oberflächen. Hier kommen überwiegend harte und flächige Fußbodenbeläge, wie Plattenwerkstoffe oder vergossene Fußbodensysteme (Estriche) aus mineralischen Materialien, aber auch Massivholzböden, zum Einsatz.

Ziel ist es, die hohen Anforderungen an die im Museumsbau eingesetzten Materialien in ökonomisch realistischem Rahmen mit einer ökologischen Zielsetzung in Einklang zu bringen, unter anderem indem regional verfügbare Materialien aus nachwachsenden Rohstoffquellen im zeitgenössischen Kontext betrachtet werden.

#### **4.2.2.1 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Für die Ökobilanz der Bekleidungen gilt vieles analog zu den vorgenannten Materialien. Ausgewählt wurden entsprechend Lehmplatten und -putze, Holzbekleidungen usw. die sich bereits in den Materialuntersuchungen als vorteilhaft erwiesen hatten. Beschreibende Vergleiche zur Beplankung der Innenwände und Decken zwischen Holzwerkstoffen, Gipsbasierten Platten sowie Lehmbauplatten in den Potentialen PE<sub>ne</sub>, PE<sub>e</sub> und GWP sowie Vergleiche von Bodenbelägen und Putzen finden sich im Anhang. Verglichen werden dabei Schichtdicken von 20mm. Für die Holzwerkstoffe ergeben sich in der Betrachtung des GWP Bilanzwerte im negativen Bereich und für die Lehmbauplatte im sehr niedrigen positiven Bereich. Beides ist daher einer konventionellen Lösung mit Gipskartonplatten oder Gipsputzen vorzuziehen.

Die Grundvoraussetzung der Kreislauffähigkeiten der verschiedenen Materialgruppen ist unabhängig vom gewählten Material ein zerstörungsfreier, rückstandloser und sortenreiner Rückbau. Dazu sollten unlösbare Verbindungsmittel wie Verklebungen vermieden und lösbare Fügeverfahren wie An- und Einpressungen oder Verschraubungen genutzt werden. Zudem wird ein hochwertiges Recycling begünstigt, wenn die verwendeten Materialien eines Bauteils aus derselben Stoffgruppe stammen. Dadurch kann auf einen zeitintensiven Rückbau einzelner Material- und Bauteilschichten im besten Fall verzichtet werden.

#### **4.2.2.2 Funktionalität**

Die äußere Gebäudehülle prägt maßgeblich das Erscheinungsbild und den architektonischen Ausdruck eines museal genutzten Gebäudes. Dieser Ausdruck wird aus der geometrischen Form, Proportionen, Licht und Schatten, dem Verhältnis von Öffnungen und geschlossenen Flächen sowie der Materialität und ihren spezifischen Eigenschaften geschaffen. Neben gestalterischen Aspekten hat die äußerste Gebäudehülle bauphysikalische und technische Ansprüche, wie u.a. Witterungsbeständigkeit, Wärme- und Schallschutz, welcher im Museumsbau von besonderer Bedeutung ist.

Hinzu kommen nutzungsspezifische Anforderungen an die Lesbarkeit der Fassade wie ein typologischer Wiedererkennungswert und eine Ausstrahlung von Öffentlichkeit. Fassadenbekleidungen haben gemäß ihrer Materialeigenschaften unterschiedliche Alterungsverhalten, Witterungsbeständigkeit, Lebensdauern und Ansprüche an die Unterkonstruktion. Unter Berücksichtigung der großen Oberfläche der Gebäudehülle und der materialbedingt begrenzten Lebensdauer, kommt der Betrachtung von langlebigen, aber auch emissionsarmen, schadstofffreien und ressourcenschonenden Materialien, die ein hochwertiges Nachnutzungspotenzial aufweisen, eine besondere Bedeutung zu. Holzprodukte erfüllen diese Anforderungen, unter Berücksichtigung des Konstruktiven Holzschutzes, der materialtypischen Eigenschaften der Holzart, der Nutzungsklasse und können die Vermittlung eines Nachhaltigkeitskonzepts oder die Ausstellungsthematik, wie z.B. Natur und Umwelt, eines Museumsneubaus an die Öffentlichkeit unterstützen (vgl. Anhang A1. 2.2.2).

Innenraumverkleidungen aus Putz oder Plattenwerkstoffen sind als innenliegender Raumabschluss für die Gestaltung sowie in Teilen für die Regulierung der Luftfeuchtigkeit und Akustik verantwortlich. Alternativ zu Gipsputz ist die Anwendung von Lehmputz aufgrund der deutlich höheren Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf besonders im musealen Kontext als passive Unterstützung der Raumklimakonstanz von Vorteil (vgl. Anhang A1. 1.3.10). Plattenwerkstoffe aus natürlichen Rohstoffen wie beispielsweise Holz, Stroh und Lehm sind wiederum ökologisch nachhaltige Alternativen zu gipsbasierten Wandverkleidungen. Sie sind besonders umwelt- und klimafreundlich und wirken sich dank ihrer hygrischen Eigenschaften positiv auf das Raumklima aus (Luftfeuchte). Die Leichtbauweise bietet neben einer guten Revisionierbarkeit Raum für Installationen und aufgrund von lösbaren Verbindungsmitteln die Möglichkeit eines einfachen Rückbaus und nachträglicher Anpassungen an mögliche Nutzungsänderungen (vgl. Anhang A1. 2.2.3).

Die Anforderungen an den Oberbodenbelag im Museumsbau liegen aufgrund der öffentlichen Gebäudenutzung und großer Lasten durch schwere Exponate schwerpunktmäßig im Bereich der Belastbarkeit, Widerstandsfähigkeit, Rutsicherheit, Akustik und der Pflegefreundlichkeit. Fußbodenbeläge, wie beispielsweise aus Massivholz, Naturstein oder Stampflehm Böden sind sehr belastbar und eignen sich für öffentliche und hoch frequentierte Gebäudenutzungen. Um die Langlebigkeit und das wertige Erscheinungsbild eines vielbegangenen Fußbodens aus Holz und Lehm zu gewährleisten, bedarf es einer robusten Oberflächenbehandlung sowie die materialgerechte Pflege während der Nutzung. Durch den Produktionsprozess von Naturstein im Vergleich zu Kunststein ist das Naturprodukt, vorausgesetzt das Abbaugelände liegt innerhalb der Region, relativ energiearm. Mit dem Hintergrund der gewonnenen Informationen im Kapitel 1.2 „Ökobeton“, sollte Estrich grundsätzlich aus einer CO<sub>2</sub>-reduzierten Bindemittel-Rezeptur zusammengesetzt sein (vgl. Anhang A1. 2.2.3).

Weitere ökologisch vorteilhafte Bekleidungen und Beplankungen werden im Anhang A1. 2.2.3 aufgeführt.

#### **4.2.2.3 Regionalität**

Während die Rohstoffe für Plattenwerkstoffe, wie beispielsweise Holz, Lehm, Stroh theoretisch deutschlandweit verfügbar sind, ist die Verarbeitung zum einbaufertigen Produkt vom jeweiligen Produktionsstandort abhängig. Die regionale Verfügbarkeit von Kompositmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen konnte aufgrund der umfangreichen Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette in der ersten Phase des Projektes noch nicht vollständig überprüft werden und soll daher in der zweiten Projektphase fortgeführt werden. Stroh beispielsweise ist als Rohstoff zwar regional verfügbar, aktuell befindet sich der nächste Produktionsstandort für Strohbauplatten allerdings in

Preloc (Tschechien). Bekannt ist, dass mehrere Natursteinbrüche in näherer Umgebung vorhanden sind. Das regionale Steinvorkommen basiert überwiegend auf Kalksandsteinen. Darüber hinaus befinden sich einige Produktionsstandorte von Vollholzprodukten und faserbasierten Holzwerkstoffplatten (u.a. OSB, Spanplatten, MDF und Holzweichfaserplatten) innerhalb des Einzugsgebiets (Vgl. Anhang Kap. 1.1.9).

Auch für Bodenbeläge, wie zum Beispiel Linoleum, findet sich ein regionaler Hersteller. Andere Oberbodenbeläge wie Fliesen oder nachwachsende Erzeugnisse wie z.B. Kork müssen dagegen in ihrer Gesamtheit noch überprüft werden. Da Korkeichen z.B. nur in Südeuropa angebaut werden, zählen Korkerzeugnisse wohl eher nicht zu den regional verfügbaren Baustoffen.

## **5 Bauteil**

### **5.1 Erdberührte Bauteile**

#### **5.1.1 Funktion**

##### **5.1.1.1 Erdberührte Außenwände**

Die tragende erdberührende Außenwand muss aufgrund der Doppelbelastung aus hohen vertikalen und horizontalen Lasteinwirkungen besonders druck- und biegesteif sein und sollte möglichst kraftschlüssig mit angrenzenden Bauteilen, wie der Bodenplatte und Fundamenten, verbunden werden. Um die hohen Nutzungsanforderung im musealen Kontext, besonders hinsichtlich des hohen Sicherheitsanspruchs gegenüber dem Ausstellungsgut, zu gewährleisten sowie Bauschäden und Wärmebrücken zu vermeiden, sollten die verwendeten Materialien möglichst widerstandsfähig gegen den Einfluss von Feuchtigkeit sein. Eine optimale gebäudeumlaufende Drainageschicht ermöglicht das Abführen von Regenwasser und vermeidet Staunässe. Sie besteht üblicherweise aus einer natürlichen Gesteinskörnung, in der Regel findet dazu Naturkies Anwendung, welcher potenziell durch mineralische Recycling-Baustoffe substituiert werden kann. Die Perimeterdämmung aus Schaumglasplatten bietet Schutz vor Wärmeverlusten und aufgrund des ständigen Temperaturgefälles zwischen Innen - und Außenraum vor Tauwasser. Als Tragstruktur ist der Einsatz von (Stahl-)Beton aufgrund der eingangs beschriebenen hohen Anforderungen nur kaum substituierbar. Ein Lehmputz von ca. 3cm bildet das Oberflächenfinish im Innenraum und sorgt aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften des Materials (vgl. Anhang A1. 1.3.3) für eine passive Regulierung der relativen Luftfeuchtigkeit.

##### **5.1.1.2 Boden**

Die bauphysikalischen und konstruktiven Anforderungen an den Bodenaufbau entsprechen schwerpunktmäßig denen der tragenden und erdberührten (Keller-)Außenwand (Gründung, Abdichtung, Wärmedämmung). Daher beschränken sich die nachfolgenden Absätze auf die Bauteilschichten des Fußbodenaufbaus oberhalb der Bodenplatte.

Im Museumsbau liegen die Anforderungen aufgrund der öffentlichen Nutzung (bis 5kN/m<sup>2</sup>, vgl. DIN EN 1991-1-1), der hohen Frequentierung durch Besucher sowie hoher Verkehrslasten durch Ausstellungsstücke, hauptsächlich im Bereich der Tragfähigkeit, Langlebigkeit, Widerstandsfähigkeit durch Abnutzung, Schallschutz und der Pflegefreundlichkeit.

Die Unterkonstruktion eines Fußbodens kann vergossen, trocken verlegt oder als Hohlraumfußboden ausgebildet werden. Neben dem Schallschutz und der Lastabtragung dient diese Schicht der

Installationsführung. Um zukünftige Nutzungsänderungen von Ausstellungsräumen durch eine flexible Installationsführung zu begünstigen, bietet ein Hohlraumfußboden aufgrund einer einfachen Anpassbarkeit und Reversibilität viele Vorteile. Darüber hinaus ist ein Doppelfußboden aufgrund der „aufgelösten“ Konstruktion materialsparender als ein massiver und gegossener Fußbodenaufbau. Der Einsatz eines trocken verlegten Estrichsystems wird aufgrund einer begrenzten Tragfähigkeit nur eingeschränkt möglich sein.

Die Oberflächenbeschaffenheit des Fußbodens hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit (z.B. Rutschfestigkeit), Akustik sowie die architektonische Raumwirkung, welche im Museumsbau eine besondere Stellung einnimmt (vgl. Kap. 4.2.2. u. Anhang A1. 2.2.4). Der Einsatz von Baustoffen wie Beton, Zement und erdölbasierter Bauteilschichten sollte jedoch aufgrund der hohen Herstellungsenergie sowie eingeschränkter Recyclingmöglichkeiten kritisch hinterfragt werden. Als Oberfußbodenbelag auf einem Hohlraumboden eignen sich verschiedene harte Oberbodenbeläge, wie beispielsweise Stirnholzpflaster, Natur- oder Kunststein (Terrazzo-Platten) (vgl. Kap. 4.2.2). Eine vorläufige Entscheidung des Oberbodenbelages konnte zum derzeitigen Planungsstand noch nicht abschließend getroffen werden.

## **5.1.2 Ökobilanz und Kreislauffähigkeit**

### **5.1.2.1 Erdberührte Außenwände**

Um den Einsatz von Beton hinsichtlich seiner negativen Auswirkungen auf Klima und Umwelt (vgl. Anhang Kap. 1.2.7) zu optimieren, wird für die erdberührte Außenwand der Einsatz eines „Öko-Betons“ und die Anwendung von Recycling-Zuschlägen und Zusatzstoffen empfohlen. Durch die Verwendung des Ökobetons werden ca. 20 % CO<sub>2</sub> eingespart im Vergleich zu einem Aufbau mit konventionellen Stahlbeton. Die Ausbildung einer weißen Wanne kann den Verzicht einer bituminösen und betonkontaminierenden Abdichtung ermöglichen, was ein hochwertiges Recycling begünstigen würde (vgl. Kap. 1.1.8). Dies muss jedoch im vorlaufenden Planungsprozess geprüft werden. Darüber hinaus bedarf diese Konstruktion eines erhöhten Einsatzes von Bewehrungsstahl.

Für die Dämmung der Wand werden in der Regel harte Dämmplatten mittels Heißbitumen oder Kaltkleber auf die Kellerwand verklebt. Anheftungen von Fremdstoffen verhindern jedoch ein stoffliches Recycling der Dämmstoffe und der tragenden Betonwand. Daher sollte der Verzicht von unlösbaren Fügetechniken bei Plattenwerkstoffen und Schaumglas-Schotter (Gewebesäcke als Montagehilfe) in Betracht gezogen werden. Die Dämmung selber könnte aus Schaumglas bestehen; Schaumglas Produkte bestehen zu einem großen Teil aus Altglas (Platten ca. 70%, Schotter ca. 98%) und stellen eine rohstoffschonende, schadstofffreie und kreislauffähige Alternative zu Erdölprodukten dar. Die Produktion von Schaumglas ist jedoch mit einem relativ hohen Primärenergieeinsatz verbunden, sodass Recycling- und Energie-Aspekte miteinander verrechnet werden müssen. Vergleicht man Schaumglas-Schotter mit Schaumglasplatten, würden bei einer gleichen Schichtdicke 85% an CO<sub>2</sub> eingespart werden (vgl. Abbildung 12). Der innen vorgesehene Lehmputz ist dank seiner hygrischen Eigenschaften wasserlöslich und in seiner reinen Form verlustfrei recycelbar und kann rückstandlos vom Beton gelöst werden (vgl. Kap. 1.3.9).



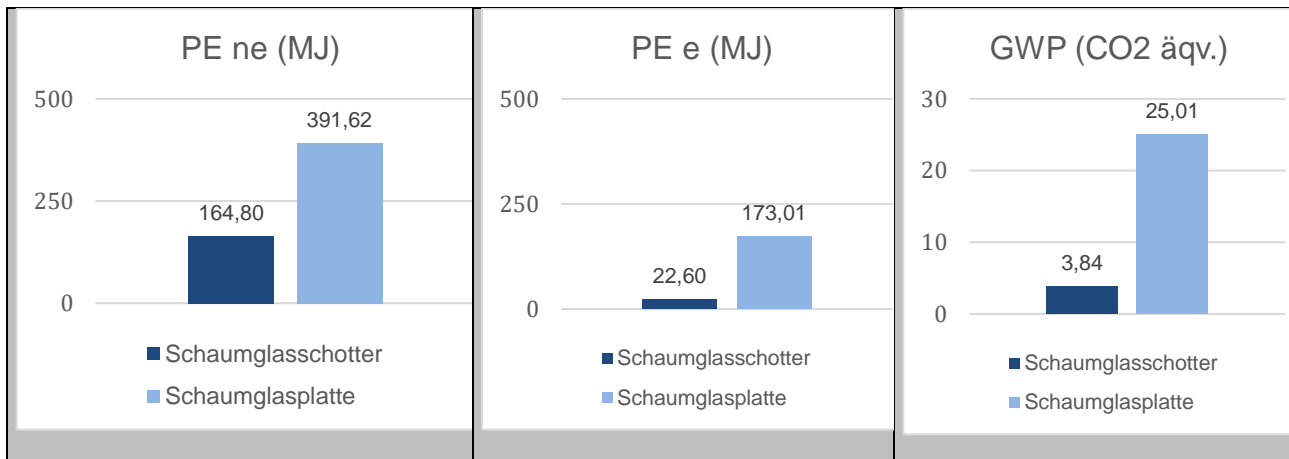


Abbildung 12 Ökologischer Vergleich zwischen Schaumglasplatten und -schotter

### 5.1.2.2 Boden

Die Ausbildung der Bodenplatte als weiße Wanne (WU-Beton) erlaubt den Verzicht einer betonkontaminierenden Abdichtung und ermöglicht somit ein sortenreines Recycling des Stahlbetonbauteils. Dieser Überlegung steht allerdings die Verwendung eines Ökobetones als nicht WU-Beton gegenüber. Zusammen mit der Berücksichtigung von Fließmitteln und weiteren WU-Zusätzen konnte diese Fragestellung in dieser ersten Projektphase noch nicht abschließend geklärt werden. Angedacht ist darüber hinaus die Verwendung von Hohlkörpern in der Bodenplatte zur Reduktion der Betonmasse, wie sie bisher üblicherweise nur in Decken eingesetzt wurden. Dies erscheint insbesondere möglich da an die Sohle selbst nur geringe statische Anforderungen gestellt werden.

Wie schon bei der Wand könnte Schaumglasschotter als Dämmschicht eingesetzt werden, um beim Rückbau dem Produktionskreislauf wieder zurückgeführt und hochwertig recycelt zu werden. Die Konstruktion des Doppelfußbodens bietet das Potenzial des sortenreinen Rückbaus. Die genaue materiale Zusammensetzung und das Recyclingpotenzial der Fußbodenunterkonstruktion sowie des Oberbodenbelags wird im laufenden Planungsprozess genauer untersucht. Grundsätzlich gilt, dass das Recycling und der Rückbau von Fußbodenoberbelägen häufig durch konventionelle Bodenaufbauten und nur schwer lösbare Füge-techniken, wie Verklebungen, stark eingeschränkt wird. Um Rückstände und Anheftungen zu vermeiden sowie den Austausch von defekten Bodenelementen zu ermöglichen, sollten lösbare Verbindungen, wie beispielsweise Klicksysteme (Nut-und-Feder-Verbindungen) Anwendung finden. Inwiefern die potentiellen Oberfußbodenbeläge, wie Stirnholz, Natursteinplatten oder Kunststeinplatten unter Berücksichtigung der hohen Nutzlasten rückbaufreundlich eingebaut werden können, soll abschließend in der zweiten Forschungsphase beantwortet werden.

### 5.1.3 Regionalität

#### 5.1.3.1 Erdberührte Außenwände

Die regionale Verfügbarkeit von Beton, sowie die einzelnen Bestandteile wurden bereits im Kapitel 4.1.2 Beton beschrieben und werden als gegeben angesehen. Insbesondere Rezyklat aus Bauschutt als Füllmaterial und Drainageschicht kann von vor Ort ansässigen Recyclingunternehmen bereitgestellt werden. Schaumglasdämmstoffe bestehen zum Großteil aus Altglas, welches Landesweit als Abfallstoff anfällt. Die Produktionsstandorte von Schaumglasplatten liegen hingegen nach aktuellem Stand der Recherche jedoch nicht im definierten Einzugsgebiet. Schaumglasschotter dagegen kann voraussichtlich aus der Region um Detmold bezogen werden. Eine weiterführende Untersuchung der Wertschöpfungskette wird aktuell als Forschungsauftrag in der zweiten Projektphase

gesehen. Der Lehmputz kann aus regionalen Lehmvorkommen stammen und von hiesigen Lehm-  
baufirmen verarbeitet werden.

#### **5.1.3.2 Boden**

Die regionale Verfügbarkeit der Baustoffe der Drainschicht, Perimeterdämmung und Beton wurden bereits im Abschnitt Bauteil „Außenwand gegen Erdreich“ beschrieben. Eine tiefgehende Betrachtung der regionalen Wertschöpfungskette von plattenförmigen Kunststeinprodukten und der einzelnen Bestandteile eines Hohlraumfußbodens (Stelzfüße und Plattenwerkstoffe) konnten in der ersten Forschungsphase nicht vollständig abgeschlossen werden und wird als Ziel der zweiten Forschungsphase definiert. Die Materialien Naturstein und massives (Hart-, Stirn-)Holz können voraussichtlich aus hiesigen Kalksandstein-Steinbrüchen und Fortwäldern innerhalb des definierten Einzugsgebiets bezogen werden.

#### **5.1.4 Bauklimatik**

##### **5.1.4.1 Potenziale erdberührter Bauteile als thermische Speicher**

Insbesondere bei Nichtwohngebäuden lassen sich immer dann, wenn hohe raumklimatische Anforderungen gestellt werden, energieintensive technische Lösungen zur Gebäudekonditionierung nur bedingt vermeiden.

Oftmals wird Energieeffizienz in baulicher Hinsicht dabei ausschließlich über den Wärmeerhalt definiert, was wachsende Dämmstoffstärken mit ebenfalls zunehmendem Herstellungsenergiebedarf zur Folge hat. Im Zusammenhang mit einer passiven Konditionierung stellt sich die Frage, in welchen Bereichen ein erdberührtes Bauteil zu dämmen und wie diese Dämmung auszuführen ist, um eine maximale Nutzung der Potenziale des Erdreichs als thermischer Speicher und gleichzeitig einen möglichst niedrigen Energiebedarf bei der angepeilten Klimakonstanz erreichen zu können.

Mit Hilfe von dreidimensionalen Gebäudesimulationen wird also die thermische Speichermasse des Erdreichs als ein Beitrag zum zukunftsweisenden Gesamtenergiekonzept von Depot- und Ausstellungsräumen in Museen hin untersucht.

##### **5.1.4.2 Erdberührte Außenwände und Bodenplatte**

Anhand von Parameterstudien werden die sich frei einstellenden Temperaturverhältnisse für eine 7,20m tiefe Gebäudelage im Erdreich (Wärmeleitfähigkeit Erdreich  $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ ) und im unkonditionierten Innenraum unter Berücksichtigung verschiedener Tiefen der Dämmung (also bis 1,2m, 2,4m, 3,6m, 4,8m, 6m und 7,2m tief ins Erdreich ausgeführte Außenwanddämmung) untersucht.

Die Ergebnisse weisen deutliche Unterschiede zum Ausgangsmodell mit gänzlich ungedämmten erdberührten Außenwänden auf sowie leichte Differenzen bei einer Variation der Dämmtiefe. Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass eine vertikale Außenwanddämmung, die bis zu einer Tiefe von 3,6m ins Erdreich reicht, die geringsten Temperaturschwankungen in Erdreich und Innenraum erwarten lässt.

Eine Maßnahmenempfehlung zur Ausführung von Dämmungen der erdberührten Bauteile kann jedoch nicht allein auf der Grundlage von dargestellten Temperaturen und Temperaturveränderungen beruhen, sondern muss auch den Energiebedarf berücksichtigen, welcher aus einzelnen Dämmmaßnahmen resultiert. Für einen solchen Vergleich wurden die Gründungsvarianten für ein fensterloses, auf dem Erdreich errichtetes Gebäude unter Annahme einer konstanten Raumtemperatur von 20 °C berechnet.

Auf diese Weise kann auf Grundlage der ein- und ausgehenden Wärmeströme, die von VOLTRA als Summe aller resultierenden Gewinne und Verluste ausgegeben werden, auf den Energiebedarf geschlossen werden, der für eine Klimatisierung im Sommer sowie für eine Beheizung im Winter erforderlich ist, um die Solltemperatur zu halten. In dem nachfolgenden Diagramm (Abbildung 13) ist dabei neben dem Energiebedarf, der aus dem ungedämmten Ausgangsmodell resultiert (blau), der Energiebedarf für eine vollflächige 5cm dicke Wärmedämmschicht (schwarz) besonders hervorgehoben. Die Nulllinie zeigt hingegen an, ob ein Kühlbedarf (negativ) oder ein Heizbedarf (positiv) besteht.

Für eine gegen angrenzende Außenluft gut wärmegeämmte, fensterlose Gebäudehülle ergibt sich ein nur geringfügiger, kurzfristiger Kühlbedarf in den Sommermonaten, während der Heizbetrieb im Winter unausweichlich ist. Durch den Vergleich der beschriebenen Ausführungen lässt sich erkennen, dass der für das Ausgangsmodell hohe Energiebedarf durch Dämmmaßnahmen reduziert werden kann.

Sämtliche Dämmmaßnahmen ziehen jedoch bei zunehmender Dämmstärke aufgrund der Entkopplung des Raumklimas von der temperaturspeichernden Erdspeichermasse eine größere Temperaturschwankung nach sich. Von der Vielzahl möglicher Varianten zur Dämmung von Bodenplatte und Wänden (d.h. horizontale Randdämmung und vertikale Dämmschürze) werden nachfolgend solche mit ähnlichem Energiebedarf dargestellt, wie er bei einer vollflächig ausgeführten 5 cm stark gedämmten Bodenplatte zu erwarten ist.

So lässt sich erkennen, dass sich für eine 3,6 m breite umlaufende Horizontaldämmung sogar ein geringerer Energiebedarf ergibt als für eine vollflächig 5 cm stark gedämmte Bodenplatte. Durch eine vertikale Dämmschürze, die besonders geringe Temperaturschwankungen im Innenraum zur Folge hatte, kann ein ähnlicher Energiebedarf ab mindestens 2,4m Tiefe erreicht werden. Eine solche Maßnahme bedeutet jedoch einen Mehraufwand bei den Erdarbeiten, wenn nicht ohnehin tiefgreifende Fundamentierungen erforderlich sind.

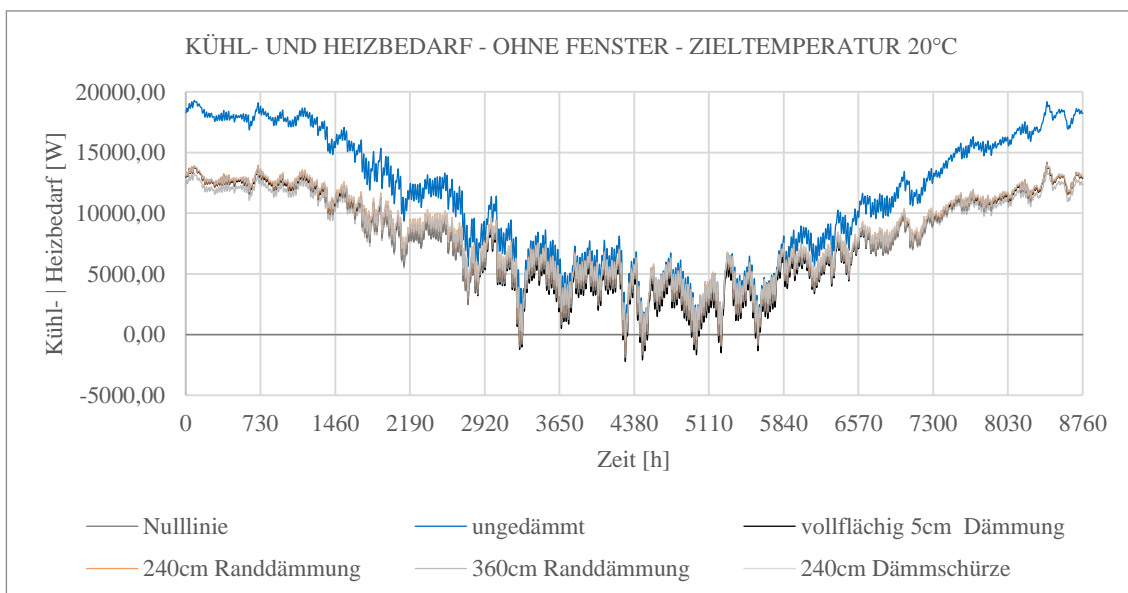


Abbildung 13: Energiebedarf für verschiedene erdberührte Dämmmaßnahmen bei 20 °C Solltemperatur innen

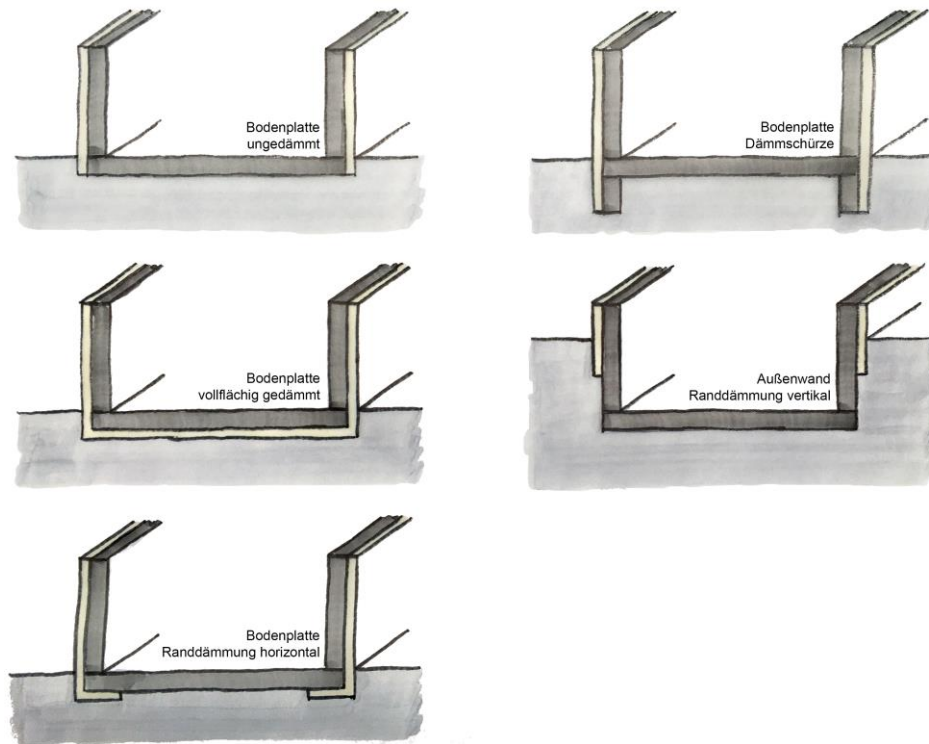


Abbildung 14: Simulierte Dämmmaßnahmen

## 5.2 Außenwand

### 5.2.1 Funktion

Aufgrund des flächenmäßig hohen Anteils der Außenwände am gesamten Gebäude fällt die materielle Zusammensetzung und die damit verbundenen vorangehenden und resultierenden Auswirkungen auf die Umwelt schwer in die Gewichtung der Ökobilanzierung. Ziel ist es, häufig verwendete, konventionelle und vermeintlich unökologische Massenbaustoffe, wie Gipskartonplatten, Kunststeine, Beton und mineralische oder erdölbasierte Dämmstoffe, in den jeweiligen Bauteilschichten durch Rohstoffe aus nachhaltigen, umweltschonenden und möglichst nachwachsenden Rohstoffquellen zu ersetzen.

Die Anforderungen, die an die Außenwand gestellt werden, unterscheiden sich je nach Bauteilschicht: Bekleidung und Beplankung (vgl. Anhang A1. 2.2.2), der Tragstruktur und der Dämmebene (vgl. Anhang A1. 2.1). Grundsätzlich ist die Außenwand maßgeblich für den Austausch von Luft, Licht sowie den Schall-, Wärme und Einbruchschutz verantwortlich. Unter Berücksichtigung der raumklimatischen Richtlinien im Museumsbau, spielen die bauphysikalischen Eigenschaften der Außenwand zum Erhalt eines konstanten Raumklimas eine bedeutende Rolle. Diesbezüglich bietet eine mineralische Massivbauweise aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit Vorteile gegenüber einer Leichtbauweise. Dem gegenüber steht ein erhöhter Ressourceneinsatz von Baustoffen, wie üblicherweise Kunststein und Beton, die Nachteile hinsichtlich der Ökobilanz und dem Recyclingpotenzial aufweisen. In einer Leichtbauweise bieten biotische und umweltschonende Baumaterialien nahezu für alle Bauteilschichten ökologische Alternativen. Beispielsweise kann die Innenwandbekleidung von einer Vollholz- oder Holzwerkstoffplatte gebildet werden, die eine aussteifende Funktion hat, dampfdiffusionsbremsend und luftdicht ausgebildet werden kann und damit den Verzicht auf eine dampfbremsende Folie ermöglicht. Darüber hinaus ist die Anwendung einer Massivholzlatung als innerer und optisch hochwertiger Wandabschluss möglich. Das lastabtragende Ständerwerk

kann vollständig aus Konstruktionsvollholz ausgeführt werden. Eine biotische Gefachdämmung wirkt dank der hohen Dichte und Wärmespeicherfähigkeit einem sommerlichen Aufheizen des Innenraums entgegen und weist einen hohen Wärme- und Schallschutz auf (vgl. Anhang A1. 2.1.7). Eine mögliche Verwendung von Baustroh stellt einen geschichtlichen Bezug zu historischen Fachwerkbauten (z.B. Strohlehm) und insbesondere der zuvor erwähnten bronzezeitlichen „hochgedämmten“ Wandrekonstruktion her (vgl. Kap. 4.2.1). Alternativ können Einblasdämmung aus „Abfallstoffen“, wie Zellulosedämmung oder Holzspandämmung, Anwendung finden.

Die äußere Fassadenbekleidung sollte diffusionsoffen oder hinterlüftet und gleichzeitig winddicht sein, um die Dämmschicht vor Tauwasser und einem Feuchteintrag zu schützen. Hierzu eignet sich eine außenseitig angebrachte Schicht aus Holzfaserverplatten, welche aufgrund der hohen Dichte, für einen sommerlichen Wärmeschutz sorgt und somit der „Schwäche“ der geringen Wärmespeicherfähigkeit des Holzleichtbaus entgegenwirken.

Der äußersten Bauteilschicht wird aufgrund des permanenten Witterungseinflusses eine deutlich kürzere Lebenszeit zugesprochen als beispielsweise dem Tragwerk. Diese sollte daher möglichst einfach zu ertüchtigen sein sowie aus langlebigen und hochwertig rezyklierbaren Materialien bestehen. Unter Berücksichtigung der Anforderungen von Holzprodukten im bewitterten Außenbereich (vgl. Anhang A1. 2.2) stellt Holz eine langlebige und umweltfreundliche Alternative zu konventionellen Fassadenbekleidungen dar.

### 5.2.2 Kreislauffähigkeit / Ökobilanz

Für die repräsentative, opaken Fassadenanteile wird analog zu den historischen Bauweisen der Ausstellungsobjekte eine Holzbauweise mit Strohdämmung vorgeschlagen. Die einzelnen Bauteilschichten wurden schon an anderer Stelle vorgestellt (vgl. Kap. 4). Im Vergleich zu einer konventionellen, repräsentativen Fassade z.B. mit Kalksandsteinwänden, Mineralwolldämmung und einer vorgehängten Holzfassade kann eine komplette Holzkonstruktion mit Strohdämmung mehr als 30 % der nicht erneuerbaren Primärenergie eingespart werden. Der Wert der erneuerbaren Primärenergie erhöht sich wie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben durch den verstärkten Einsatz von Holz. In der Bilanz der Treibhausgase reduziert sich das GWP von 59 kg auf – 115 kg CO<sub>2</sub> eq.

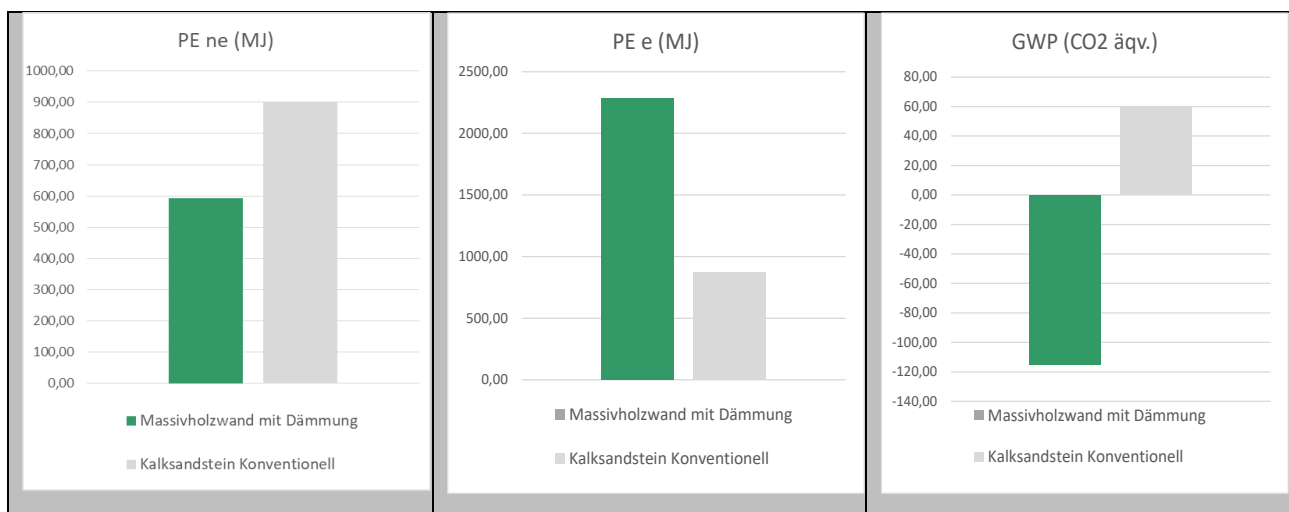


Abbildung 15 Auszug aus dem ökologischen Vergleich verschiedener Außenwand-Konstruktionen

Für die Fensterflächen der Fassade soll eine Holz-Pfosten-Riegel-Fassade einer Stahl- oder einer Aluminium-Pfosten-Riegel-Fassade vorgezogen werden, da der Fensterflächenanteil einen großen

Teil der Außenwandflächen einnimmt und somit die Ökobilanz in einem maßgeblichen Teil beeinflusst. In Bezug auf die Raumwirkung kann so auch eine gestalterische Aussage zur Nachhaltigkeit getroffen werden, die das Material Holz für den Besucher visuell inszeniert.

Der schichtweise Aufbau sowie die Verwendung von lösbaren Verbindungsmittel, wie Einpressen und Schrauben, kann theoretisch einen zerstörungsfreien Rückbau der Wandkonstruktion analog zum Einbau ermöglichen. Die Lehmbauplatte mit Lehmputz kann unter der Zugabe von Wasser vollständig replastifiziert werden. Dadurch können Lehm, Zusatzstoffe und das Jutegewebe sortenrein voneinander getrennt und verwertet werden. Alternativ kann die Lehmbauplatte aufgrund der natürlichen Materialzusammensetzung in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Alternativ zu einer möglichen Wiederverwendung, sollten Holzwerkstoffplatten auf dem höchsten Qualitätsniveau recycelt und Teil einer Kaskadennutzung werden, bevor eine thermische Verwertung in Betracht gezogen wird. Das Vollholz (KVH) der Ständerwand und der Fassadenbekleidung, in starker Abhängigkeit der witterungsbedingten Alterung, kann im einwandfreien Zustand gleichwertig wiederverwendet oder gemäß einer Kaskadennutzung recycelt werden. Eine Gefachdämmung aus Baustroh ist frei von Schadstoffen und chemischen Bindemitteln und daher kompostierbar. Alternativ ist eine Weiterverarbeitung zu einer Einblasdämmung denkbar. Eine Einblasdämmung aus Zellulose oder Holzspänen könnte analog zum Einbau, aus den konstruktiven Holträumen abgesaugt und wiederverwendet werden.

### **5.2.3 Regionalität**

Die Außenwand kann nahezu vollständig aus regional hergestellten Bauteilen zusammengesetzt werden. Das Ständerwerk, die Fassadenbekleidung aus Vollholzprodukten und Holzwerkstoffprodukte (z.B. OSB, MDF) können u.a. aus der regionalen Wertschöpfung in Südwestfalen und Ostwestfalen-Lippe bezogen werden. Eine mögliche Strohballendämmung kann theoretisch auf Feldern in der direkten Umgebung angebaut und vor Ort eingebaut werden. Große Zentrallager für Baustroh befinden sich in Paderborn und Hannover.

## **5.3 Dach (Tragwerk)**

### **5.3.1 Funktion**

Die Dachkonstruktion moderner Architektur und insbesondere Großbauten, wie beispielweise Museumsbauten, stellen erhöhte Anforderungen an die Baukonstruktion. Es sind große Spannweiten gefragt, eine hohe Belastbarkeit und Steifigkeit, optimierte bauphysikalische Eigenschaften, konstruktiver Brandschutz und Vieles mehr. Bei der Betrachtung zeitgenössischer Museumsbauten scheinen Dachkonstruktionen aus Stahlbeton oder einer hybriden Konstruktion aus Stahl und Stahlbeton zu dominieren, wohingegen Holz eine untergeordnete Rolle spielt. Die Materialkombinationen bieten viele Vorteile: hohe Tragfähigkeit, nahezu uneingeschränkte gestalterische Möglichkeiten und dank des Betonanteils, eine hohe Wärmespeicherfähigkeit und somit erhöhten Schutz vor raumklimatischen Schwankungen. Für museale Nutzungen mit hohen Anforderungen an ein konstantes Raumklima ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung, da die Dachfläche den permanenten Einflüssen der Witterung und besonders der Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist. Aufgrund der vielfältigen ökologischen Vorteile und der naheliegenden Inspiration durch die ortsprägenden Fachwerkbauten des Freilichtmuseums soll die Dachkonstruktion durch ein Holztragwerk ausgebildet werden (vgl. Anhang A1. 1.1.2).

Die maßgebende Funktion dieses Bauteils ist die Überbrückung großer Raumtiefen. Der moderne Ingenieurholzbau bietet für diese Bauaufgabe verschiedene materielle und konstruktive Lösungen. Verleimte Holzquerschnitte, wie Brettschichtholz, sind in der Querschnittsabmessung sowie der

Formgebung flexibel anpassbar und weisen einen homogeneren Querschnitt im Vergleich zu Vollholzprodukten auf und ermöglichen dadurch die Überbrückung von deutlich größeren Spannweiten und Belastungen. Darüber hinaus können traditionelle Tragwerkskonstruktionen, wie Fachwerkträger und zusammengesetzte Träger, durch Leimholz- und Holzwerkstoffprodukte in Kombination mit hochbelastbaren Verbindungsmitteln aus Metall und erdölbasierter Klebstoffe optimiert werden (vgl. Anhang A1. 1.1.3f). Diese modernen Verbindungsmittel machen Holz zu einem Hochleistungsbaustoff, wirken sich jedoch aufgrund von energieintensiven Herstellungsprozessen zu einem gewissen Grad negativ auf die Ökobilanz aus. Im Versuch der Klimakrise gerecht zu werden, wird das Ziel definiert, am traditionellen Holzbau, der durch die Verwendung von Vollholzprodukten und überwiegend zimmermannsmäßigen Holz-Holz-Verbindungsmitteln geprägt ist, wieder anzuknüpfen (vgl. Anhang A1. 1.1.2 u. A1. 1.1.5). Dazu soll er mithilfe computergestützter und automatisierter Fertigungstechniken optimiert und neu interpretiert werden, um ihn für Großbauten ökonomisch einsetzbar zu machen (vgl. Anhang A1. 1.1.7). Pilotprojekte stellen unter Beweis, dass die Umsetzbarkeit von anspruchsvollen und monomateriellen Verbindungspunkten im Bereich von Stütze und Träger, bereits möglich ist (vgl. Anhang A1. 1.1.6). Die Tragwerkelemente bestehen jedoch weiterhin aus Leimholz. Daher wird das Ziel definiert, hoch beanspruchte Holzträger in Form von beispielsweise stahlfreien Fachwerkträgern oder gedoppelten Trägern aus Vollholzquerschnitten „wieder neu zu erfinden“ und den Holzbau weiter ökologisch zu optimieren (vgl. Anhang A1. 1.1.3ff).

Die Sekundärkonstruktion kann aus stabförmigen Holzbauteilen oder leimfreien Massivholzelementen, wie beispielsweise Dübelholzplatten, bestehen und mittels einstofflicher Holz-Verbindung, wie beispielsweise einem Zapfenstoß (vgl. Anhang A1. 1.1.5.) oder einer Verzahnung, kraftschlüssig an das Haupttragwerk montiert werden. Massivholzplatten führen den Vorteil mit sich, zur Aussteifung des Primärtragwerks beizutragen und durch die Massivität die Wärmespeicherfähigkeit der Außenhülle zu erhöhen. In der zweiten Forschungsphase soll ermittelt werden, inwiefern die konstruktiven Zielsetzungen technisch realisierbar sind und sich die Reduktion des erdölbasierten Bindemittels und/oder der metallenen Verbindungsmittel, in Abhängigkeit eines hochwertigen Recyclings und wirtschaftlicher Umsetzbarkeit, den ökologischen Fußabdruck des Bauvorhabens beeinflussen kann.

Die Ästhetik eines Holztragwerkes gepaart mit zukunftsweisender Ingenieurskunst orientiert an traditioneller zimmermannsmäßiger Handwerkskunst kann für die Besucher des Museums besonders hinsichtlich der Fügepunkte des Primärtragwerks sichtbar gemacht werden und so die Architektur zu einem Teil der Ausstellung machen.

### **5.3.2 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Für die Tragkonstruktion ergibt sich eine klare Überlegenheit der Holzkonstruktionen. Fast unabhängig von der Materialstärke weist die Stahlbetondecke in allen ökologischen Bereichen die ungünstigsten Werte auf – während bei den Holztragwerken materialaufwändigere Konstruktionen sogar zu besseren Ergebnissen in den Kategorien PE n.e. und GWP führen. Die hohen Werte im Bereich PE e. können als Energiespeicher interpretiert werden, so dass sie nicht in die Entscheidungsfindung einfließen müssen. Kunstharze als Kleber sollten aber dennoch vermieden werden, um die Bilanz nicht wieder zu verschlechtern. Bei einer massiven Stahlbetonkonstruktion des Daches sollte Öko-Beton dem konventionellen Stahlbeton vorgezogen werden. Die Öko-Betonversion weist einen in allen Betrachtungspunkten geringeren Wert auf als die konventionelle Version.

In der ökologischen Bilanzierung zeigt sich, dass eine Dämmung aus Baustroh um ein Vielfaches günstigere Werte aufweist als konventionelle Dämmstoffe, wie beispielsweise Steinwolle. Erwartungsgemäß sollten also bei der Zielsetzung möglichst geringer CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Herstellung eines Gebäudes biogene Dämmstoffe bevorzugt eingesetzt werden. Dass in diesem Zusammenhang Stroh besonders niedrige Werte aufweist, wurde bereits in Kapitel dargestellt.

Um eine Kaskadennutzung oder Wiederverwendung von Altholz aus Abrissbaustellen zu vereinfachen und somit das konservierte Kohlenstoffdioxid möglichst lange zu binden, ist dies zukünftig bereits bei der Erbauung des Gebäudes zu berücksichtigen. Dazu kann ein konstruktiver Holzschutz und materialgerechter Einsatz von Holzprodukten einen langfristigen Erhalt der Qualität gewährleisten. Außerdem kommen Lösbarkeit und Monomaterialität der Kreislauffähigkeit zugute. Bei der Auswahl der Verbindungsmittel muss zwischen vermeintlich unlöslichen, einstofflichen Holz-Holzverbindungen oder potenziell löslichen, aber ökologisch nachteilhaften Verbindungsmitteln aus Metall abgewogen werden. Die Wiederverwendung von stabförmigen Bauteilen aus Vollholz, meist aus langlebigen Laubhölzern, ist eine gängige Praxis bei der Restaurierung von historischen Gebäuden. Die leichte Bearbeitbarkeit und lösbare Fügepunkte erlauben am Ende der Nutzungsdauer in vielen Fällen eine Weiterverwendung von Holzbauteilen auf gleichem Niveau, wie sich bei einem Rundgang durch das Freilichtmuseum Detmold an zahlreichen Fachwerkgebäuden nachweisen lässt. Die älteste und inzwischen über 100 Jahre alte Leimholzkonstruktion der Hetzerhalle (1910), verdeutlicht, dass auch Leimholzprodukte äußerst langlebig sein können. Der konventionelle Umgang mit Altholz von Baustellen sieht jedoch anders aus. Vor einem Wiedereinbau müssen aufwendige Untersuchungen bezüglich Verformung, Mängel und Schäden, Oberflächenbeschaffenheit, Tragfähigkeit, chemische Behandlungen (Kontaminierung), sowie Feuchtegehalt, Schädlings- und Pilzbefall durchgeführt werden. Bei der Wiederverwendung von Leimholzbauteilen, wie einem Brett-schichtholz-binder, kommt zu den o.g. Aspekten die Gewährleistung der Klebefugenintegrität erschwerend hinzu. Erst wenn haftungsrechtliche, statische und bauphysikalische Zweifel beseitigt werden können, darf das Bauteil wieder als solches eingesetzt werden. Begünstigender Faktor für eine Wiederverwendung ist die Bearbeitbarkeit des Altholzes. Durch Sägen und Schleifen kann ein Bauteil gegebenenfalls an neue Anforderungen angepasst werden. Theoretisch ist die Rückgewinnung von Brett-lamellen eines BSH-Bauteiles durch ein Auftrennen entlang der Klebefuge möglich, findet in der Praxis jedoch keine Anwendung (vgl. Anhang A1. 1.1.8).

### **5.3.3 Regionalität**

Konstruktionsvollholz (Laub und Nadelholz) und Leimholzprodukte (Nadelholz), wie BSH, Duo- und Triobalken, können voraussichtlich, wie bereits beschrieben, durch die Nähe zu hiesigen Forstwäldern und Holzverarbeitenden Betrieben innerhalb des Einzugsradius von 200km um Detmold bezogen werden (vgl. Anhang A1. 1.1.9). Die Produktion von leimfreien Massivholzelementen, wie beispielsweise Dübelholzplatten, findet in hoch spezialisierten Betrieben statt, welche nach aktuellem Kenntnisstand nicht in der direkten Umgebung angesiedelt sind. Ziel der zweiten Forschungsphase ist es, die vollständige Wertschöpfungskette (u.a. Forstwald, Sägewerk, Holzwerkstoffproduktion, Holzbaubetriebe etc.) mit dem Schwerpunkt eines hohen Vorfertigungsgrad innerhalb des Einzugsgebiets und die Auswirkung durch transportbedingte Emissionen auf die Ökobilanz aller eingesetzter Holzprodukte zu untersuchen.



## 5.4 Decke

### 5.4.1 Funktion

Die bauphysikalischen und statischen Anforderungen, die an eine bewitterte, hoch frequentierte und befahrbare Dachkonstruktion gestellt werden, sind im Vergleich zum Dachtragwerk (vgl. Kap. 5.1.4) deutlich höher. Eine Stahlbetonkonstruktion erfüllt dieses Anforderungsprofil und stellt eine wirtschaftliche, materialgerechte und daher die meistgewählte baukonstruktive Lösung für diesen Anwendungsbereich dar. Da der Einsatz von (Stahl-)Beton im Rahmen umweltfreundlicher Architektur kritisch hinterfragt wird, sollten möglichst viele „Stellschrauben“ der ökologischen Optimierungsmöglichkeiten betätigt werden (vgl. Anhang A1. 1.2.8). Die Idee das Eigengewicht von massiven Betonbauteilen durch eine Kassettierung oder den Einbau von Hohlkörpern und Leichtzuschlägen zu verringern, entstand bereits zur Zeit der römischen Antike. Aus diesem Zweck verwendeten die Römer beim Bau der Kuppel des Pantheons (126 n. Chr., Rom) unter anderem Leichtzuschläge wie Bims und Tuff sowie leere Amphoren, welche im Beton eingegossen wurden, um die Dichte des Betons zu reduzieren. Während die Römer die Dichte aus konstruktiven Aspekten reduziert haben, kommt heutzutage der Aspekt hinzu, Zement, Stahl und somit CO<sub>2</sub> einzusparen. Angelehnt an die antike Betonkonstruktion kann eine moderne und zweiachsige Hohlkörperdecke die Anforderungen an zeitgenössische Großbauten erfüllen. Die Hohlkörperelemente bestehen aus Recyclingkunststoff, können rund oder eckig geformt sein und ersetzen bis zu etwa einem Drittel des Volumens einer Stahlbetondecke. Dabei substituieren die Verdrängungskörper Beton in den Bereichen, in denen er nicht für die Tragfähigkeit der Konstruktion erforderlich ist. Die Reduktion des Betonvolumens bewirkt, den Einsatz von 5-20% weniger Bewehrungsstahl und erhöht gleichzeitig die Tragfähigkeit bei einer relativ geringen Bauteildicke. Durch die Reduktion des Stahl- und Betonanteils gepaart mit einer CO<sub>2</sub> reduzierten Zementrezeptur und dem Einsatz von Recyclingzuschlägen kann der ökologische Fußabdruck des Deckenbauteils deutlich verbessert werden. Die gewichtsreduzierte Deckenkonstruktion wirkt sich zudem positiv auf angrenzende und lastabtragende Bauteile aus, die filigraner dimensioniert werden können. Die optische Qualität der raumseitigen Bauteiloberfläche wird durch die Eigenschaften der Schalung und Oberflächenbehandlung definiert (vgl. Anhang A1. 1.2.5). Darüber hinaus bietet die massive Bauweise einen guten Schutz gegen Schall, sommerliche Überhitzung und aufgrund der Brandeigenschaften von Beton einen hohen Feuerwiderstand.

Eine außenliegende Abdichtung kann alternativ zu einer betonkontaminierenden unlöslichen Verklebung durch eine lose verlegte (mehrlagige) Folie ausgebildet werden. Die darüber liegende Dämmschicht stellt neben dem Schutz vor Wärmeverlusten und Tauwasser hohe nutzungsbedingte Anforderungen an die Druckfestigkeit, Beständigkeit und Wasserunempfindlichkeit. Schaumglas-Plattendämmungen (bis zu 70% Altglasanteil) stellen für diesen Anwendungsbereich eine ressourcenzfreundliche und (in reiner Form) kreislauffähige Alternative zu erdölbasierten Hartschaumplatten dar. Alternativ folgt darüber eine wasserführende Schicht, die in der Regel aus einer (mehrlagigen) Bitumenbahn besteht, die auf den Untergrund verklebt oder geschweißt wird. Um einen rückstandlosen Rückbau der Dämmschicht zu ermöglichen, kann die Dachabdichtung auf eine Trägerplatte, ähnlich einer verlorenen Schalung, montiert werden, die mit der Dachabdichtung entsorgt werden könnte. Die äußerste Bauteilebene bildet der Oberbodenbelag und die dazugehörige Unterkonstruktion (Drainageschicht, Schottertragschicht, Ausgleichsschicht). Für diesen Anwendungsbereich werden Plattenwerkstoffe oder Pflastersteine aus Kunst- und hiesigem Naturstein (Kalksandstein) in Betracht gezogen.

### **5.4.2 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Für die hochbelastete Decke wurde im ersten Schritt ein Bauteil aus Öko-Beton mit Hohlkörpereinsätzen und Beton vorgeschlagen, was es in dieser Kombination bisher noch nicht gegeben hat. (Zulassung im Einzelfall erforderlich; auch für Öko-Beton alleine). Die detaillierte Betrachtung in der Ökobilanz zeigt jedoch, dass die Herstellung der Hohlkörper aus Polypropylen die Einsparungen im Beton zumindest im Kriterium PE nicht erneuerbar überwiegt und so tatsächlich im Vergleich zu einem massiven Betonbauteil ein etwas höherer Aufwand entsteht. Hierbei ist sowohl die verringerte Betonmasse als auch eine Reduktion des Bewehrungsstahles bereits berücksichtigt worden.

Um dennoch eine nennenswerte Betonmasse einzusparen, soll die Decke nach aktuellem Stand kassettiert werden, was das angewandte Prinzip tatsächlich auch sichtbarer macht als die Verwendung von Hohlkörpern im geschlossenen Bauteil.

Eine Berücksichtigung von Betonrezyklat hat bisher nicht stattgefunden, da hierzu bislang keine Ökobilanzdaten existieren. Die weiteren Potentiale dieser Untersuchung werden im Anhang weitergehend erläutert.

Eine Hohlkörperdecke könnte dank der lose verlegten Dachabdichtungsbahn rückstandlos rückgebaut und recycelt werden. Die einbetonierten Hohlkörper können im Recyclingprozess aufgrund der geringeren Dichte im Vergleich zu Beton getrennt werden, was im Falle einer Kassetten-Decke als zusätzlicher Aufwand entfällt.

Die dämmenden Schaumglasplatten sollten im vorliegenden Fall nicht vollflächig verklebt werden, da dies ein hochwertiges Recycling von Dichtungsbahn und der Schaumglaselemente stark einschränkt. Im laufenden Planungsprozess soll die Umsetzbarkeit von mechanischen und lösbaren Fügungen untersucht werden. Hinsichtlich einer möglichen außenseitig angebrachten Abdichtungsbahn auf einer Trägerplatte wird das Potenzial geschaffen, die Dämmung rückstandlos zurückzubauen. Aufgrund der bituminösen Anheftung ist lediglich eine energetische Verwertung für die OSB-Patte möglich. Noch nicht berücksichtigt ist eine ggf. erforderliche Bautenschutzmatte als Trittschalldämmung in der Konstruktion. Die Unterkonstruktion des Oberbodenbelags aus Aluminium kann problemlos zurückgebaut und hochwertig recycelt werden. Die Natursteinplatten können ebenfalls gleichwertig wiederverwendet werden.

### **5.4.3 Regionalität**

Die bauteilspezifischen Hohlkörper aus Recycling-Kunststoff der gewichtsreduzierten Deckenkonstruktion werden voraussichtlich nicht aus Deutschland bezogen werden können.

Wie bereits beschrieben ist Beton, wie auch Recyclingkies aus Bauschutt regional verfügbar. Die regionale Verfügbarkeit von Stahl für die Bewehrung sowie die Unterkonstruktion aus Aluminium des Dachbelags konnte in der ersten Phase des Projektes noch nicht vollständig überprüft und ermittelt werden. Die Produktionsstandorte von Schaumglasplatten liegen, wie bereits beschrieben, nach aktuellem Stand der Recherche nicht im definierten Einzugsgebiet. Eine weiterführende Untersuchung der Wertschöpfungskette wird als Forschungsauftrag der zweiten Projektphase gesehen. Plattenwerkstoffe aus Holz können von regional ansässigen Herstellern bezogen werden. Natursteinplatten können aus Sandstein-Steinbrüchen der näheren Umgebung bezogen werden.

## 5.5 Innenwand (tragend)

### 5.5.1 Funktion

Tragende Innenwände im Kontext musealer Großbauten weisen aufgrund ihrer lastabtragenden, aussteifenden Funktion unter hohen Lasteinwirkungen erhöhte Anforderungen an die Tragfähigkeit auf. Aus baukonstruktiven, aber auch wirtschaftlichen Aspekten finden daher üblicherweise massive Wände aus Beton oder Kunststein Anwendung. Insofern das Bauteil nicht in Sichtqualität ausgeführt wird, erhalten die Wandoberflächen meist einen Putzauftrag, um eine neutrale und einheitliche Oberfläche zu erzeugen. Konventionelle Massivwände führen jedoch Einschränkungen und Nachteile hinsichtlich der Umwelt- und Klimaverträglichkeit sowie dem Recyclingpotenzial mit sich.

Massivholzelemente (vgl. Anhang A1. 1.3.3ff) und tragende Lehmbaumstoffe (vgl. Anhang A1. 1.3) stellen hierbei ökologische Alternativen zu konventionellen Massenbaumstoffen dar.

Lehm ist für die Anwendung im musealen Kontext aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften sowie der Aufnahmefähigkeit und zeitversetzten Abgabe der relativen Raumfeuchte besonders geeignet. Dabei trägt der mineralische Baumstoff zur Klimakonstanz bei, welche im Museumsbau zum Schutz des Ausstellungsguts eine besondere Bedeutung einnimmt. Darüber hinaus besteht das Potenzial einen großen Anteil der Betriebsenergie der Klimaanlage durch die passive Raumluft-Regulierung einzusparen (vgl. Anhang A1. 1.3.10).

Unter museal-didaktischen Gesichtspunkten ist besonders das Erscheinungsbild einer Stampflehmwand aufgrund der Ablesbarkeit des Herstellungsprozesses sehr gut geeignet (vgl. Anhang A1. 1.3.5).

Die Herstellung kann auf der Baustelle oder im Werk durch eine in Teilen automatisierte Vorfertigung ausgeführt werden. Die werkseitige Vorfertigung kann ökonomische, qualitative und planerische Vorteile mit sich führen. Ein Forschungsprojekt der Universität Braunschweig zeigt zudem das Potenzial einer digitalisierten und robotergestützten Produktion auf (vgl. Anhang A1. 1.3.8).

Das Prinzip der Herstellung basiert auf der lagenweisen Druck-, Stampf- oder Vibrationsverdichtung von feuchtem Lehm mit einem hohen Kiesanteil in einer Schalung. Die (Kletter-)Schalung definiert dabei die Breite der Stampflehmwand und „wandert“ mit dem schichtweisen Wachsen der Wand in die Höhe. Die Austrocknungszeit einer vor Ort hergestellten Stampflehmwand dauert ca. 6-8 Wochen und sollte im Planungsprozess berücksichtigt werden (vgl. Anhang A1. 1.3.5). Die hohe Dichte (1700 – 2200 kg/m<sup>3</sup>) und Tragfähigkeit des Materials bei entsprechenden Wandstärken ermöglicht die Ausbildung als tragende Innenwand. Wohingegen eine Stampflehmwand hohe Druckkräfte aufnehmen kann, ist die Belastbarkeit durch Scher- und Zugkräfte begrenzt (vgl. Anhang A1. 1.3.3).

In Abhängigkeit der Wandstärke und Lasteinwirkungen, kommen horizontale Bewehrungen aus Stahlbeton und Geogitter zum Einsatz, die die Standfestigkeit erhöhen. Hier kann alternativ die Verwendung einer Vollholz-Bewehrung in Betracht gezogen werden. Darüber hinaus bietet eine Stampflehmwand aufgrund der Massivität und Materialeigenschaften einen hohen Schall- und Brandschutz. Die Wärmespeicherfähigkeit der Lehm-Massivbaumwand ergänzt den Holzleichtbau und sorgt für eine Stabilisierung der Raumlufttemperatur (vgl. Anhang A1. 1.3.3).

Nach den aktuellen Lehmbaum Regeln setzt die Errichtung einer Stampflehmwand in einem öffentlichen Gebäude die Zulassung im Einzelfall voraus.

## **5.5.2 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Kommt es zum Rückbau und der Frage des Recyclings der Stampflehmwand, hat sie im Vergleich zur verputzten und/oder gemauerten Massivwand den entscheidenden Vorteil, dass die verbauten Materialien rückstandlos mit geringem Energie- und Arbeitsaufwand voneinander getrennt werden können. Die Bewehrungseinlagen aus Beton und Glasfaser (Geogitter) können durch die Zugabe von Wasser rückstandlos aus dem konstruktiven Gefüge getrennt werden, sodass der Lehm verlustfrei recycelt oder dem natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann (vgl. Anhang A1. 1.3.9).

## **5.5.3 Regionalität**

Um den Umgang mit dem endlichen Rohstoff Lehm möglichst nachhaltig zu gestalten, wird das Ziel definiert, einen möglichst großen Anteil des potenziell lehmhaltigen Baustellenaushubs für die Errichtung der Stampflehmwand zu recyceln und aufzuarbeiten. Dazu konnte ein regional ansässiger Lehmhersteller bereits ausfindig gemacht werden. Es ist anzunehmen, dass der lokal verfügbare Rohlehm in seinem natürlichen Vorkommen nicht der materiellen Zusammensetzung für die Verwendung als Stampflehmwand geeignet ist. Weitere Zuschläge, wie eine zusätzliche Gesteinskörnung, können voraussichtlich aus Steinbrüchen und von Recyclinghöfen aus der Region um Detmold bezogen werden.

## **5.6 Innenwand (nichttragend)**

### **5.6.1 Funktion**

Innenwände ohne statische Anforderungen dienen hauptsächlich der Abgrenzung unterschiedlicher Nutzungseinheiten. Die Anforderungen an nicht tragende Innenwände sind vielfältig und liegen schwerpunktmäßig im Bereich der Gestaltung und bauphysikalischen Aspekten, wie dem Schall-, Wärme- und Brandschutz. Durch den direkten Kontakt zur Raumluft haben die bauphysikalischen Eigenschaften der Bauteilschichten einen maßgebenden Einfluss auf das Raumklima. Die materielle Bauteilzusammensetzung lässt dem Planer dank geringer statischer Anforderungen einen relativ großen Spielraum. In Gebäuden, wie Museumsbauten, die für eine möglichst lange Lebensdauer geplant werden, bestehen Anforderungen an eine flexible Nutzungsänderung durch eine leichte Anpassbarkeit der statisch nicht relevanten Wände.

Nichttragende Wände können als Massiv- oder Trockenbauwand ausgebildet werden. Die konventionelle Trockenbauwand besteht aus gipsbasierten Plattenwerkstoffen, einem Ständerwerk aus Stahlblech und einer Mineralfaserdämmung. Insofern massive Innenwände nicht in Sichtqualität ausgeführt werden, erhalten die Wandoberflächen einen Putzauftrag. Die ökologischen Nachteile konventioneller Wandaufbauten und Materialzusammensetzung wurden in vorangehenden Kapiteln bereits beschrieben und bedürfen umweltfreundlicher Alternativen.

Leichtbauwände können vollständig aus ökologisch nachhaltigen Baustoffen zusammengesetzt werden. Als flächige Verkleidung eignen sich Holzwerkstoff-, Lehm- oder alternativ Baustrohplatten, welche ein Oberflächenfinish aus Lehmputz erhalten können. Dank der bereits erwähnten bauphysikalischen und hygroskopischen Eigenschaften von Lehm kann diese Schicht durch den direkten Kontakt zur Raumluft sich positiv auf das Raumklima auswirken. Zudem ermöglicht die fehlende Brennbarkeit von Lehm den Einsatz in Bauteilen mit hohen Feuerwiderstandsklassen. Die Tragstruktur des Ständerwerks kann aus Konstruktionsvollholz erreicht werden. Eine Gefachdämmung aus nachwachsenden CO<sub>2</sub>-konservierenden Rohstoffen, wie beispielsweise Holzfasern, Jute oder Hanf, bietet dank einer hohen Dichte und Weichheit einen guten Schallschutz.

Einschränkungen biotischer Baustoffe entstehen bei der Anwendung in übermäßig feuchten Räumen sowie bei Anforderungen an die Nicht-Brennbarkeit (vgl. Anhang A1. 2.1 u. A1. 2.2).

### **5.6.2 Ökobilanz / Kreislauffähigkeit**

Für die nichttragende Innenwand wurden eine Trockenbaukonstruktion mit Lehmbauplatten, eine Lehm-Massivwand und eine konventionelle Gipskarton-Wand mit Metallständern verglichen.

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Aufbauten zeigt in Betrachtung der nicht erneuerbaren Primärenergie die Vorteile einer Leichtbaukonstruktion aus Holz, die mit Lehmbauplatten beplankt und einem biotischen Dämmstoff ausgedämmt wurde. Wie alle Konstruktionen aus biogenen Baumaterialien weist sie einen erhöhten Wert bei den erneuerbaren PE -Inhalten auf (vgl. Anhang A3 6.7). Im GWP zeigt sich in der Bilanz die geringe Masse eines Quadratmeters Trockenbauwand. Entsprechend sind auch die Bilanzdaten niedrig. Für die Wand mit den nachwachsenden Dämmstoffen kann sogar eine negative CO<sub>2</sub> Bilanz nachgewiesen werden.

Ähnlich wie beim Rückbau der Außenwand, besteht das Potenzial, die einzelnen Schichten der Trockenbauwand aus dem konstruktiven Kontext zurückzubauen. Die Voraussetzung für einen zerstörungsfreien und sortenreinen Rückbau ist die Verwendung von löslichen Fügeverfahren und Verbindungsmitteln, wie beispielsweise An- und Einpressen der Gefachdämmung in das Ständerwerk sowie die Montage der Lehmbauplatten mittels Schrauben. Spachtel- und Putzschichten verdecken jedoch üblicherweise Schrauben und erschweren daher einen Rückbauprozess. Die direkte Wiederverwendung der Holzweichfasermatte ist theoretisch möglich. Das Recycling gemäß einer kaskadenartigen Nachnutzung ist dabei stets einer energetischen Verwertung vorzuziehen. Die möglichen Recyclingwege von Konstruktionsvollholz und Lehmbauplatten mit Lehmputzauftrag wurden bereits im Kapitel 5.3 „Außenwand“ beschrieben. Eine Baustrohplatte ist frei von chemischen Bindemitteln und könnte kompostiert und biologisch abgebaut werden.

### **5.6.3 Regionalität**

Das regionale Vorkommen von Holzprodukten, wie Vollholz und (harten) Holzwerkstoffplatten, wurde bei vorangehenden Bauteilen bereits beschrieben. Die hiesige Verfügbarkeit von flexiblen Dämmstoffmatten (z.B. Holzfaser) aus nachwachsenden Rohstoffquellen ist aufgrund einer begrenzten Anzahl deutscher Produktionsstandorte wahrscheinlich nicht gegeben (vgl. Kap. 1.1.9). Ein potenzieller Produktionsstandort von Lehmbauplatten befindet sich in Emmerich nahe der niederländischen Grenze im vordefinierten Einzugsradius. Auch wenn der Baustoff Stroh hierzulande regional verfügbar ist, befindet sich der nächste Produktionsstandort für Strohbauplatten in Tschechien. In der zweiten Forschungsphase soll eingehend untersucht werden, inwiefern transportbedingte Emissionen von ökologisch vorteilhaften Baustoffen, wie Stroh, im Vergleich zu regional verfügbaren und in Relation weniger umweltfreundlichen Baustoffen sich in der Öko-Bilanzierung auswirken. Das Rohmaterial des Lehmputzes kann voraussichtlich aus regionalen Rohstoffquellen gewonnen und vom regionalen Lehmhersteller (z.B. Conluto) aufgearbeitet werden.

### **5.6.4 Bauklimatik**

Im Museumsgebäude soll trotz aller Anforderungen an Komfort für Besucher und Mitarbeiter und an die Bereitstellung konservatorischer Verhältnisse mit vergleichsweise geringeren haustechnischen Maßnahmen ein möglichst ausgeglichenes Raumklima herrschen. Dies ist nur durch den Einsatz von Materialien mit hoher Feuchte- und Wärmespeicherfähigkeit möglich, sodass von außen einwirkende klimatische Störgrößen in ihrer Wirkung auf die klimatische Situation im Raum abgemildert

werden. Auch schwankende Wärme- und Feuchtelasten, die im Innern auftreten, werden somit kurz- und mittelfristig in Baustoffen zwischengespeichert und zu späteren Zeitpunkten wieder freigegeben.

In der Literatur wird Lehm als feuchtepuffernder Baustoff beschrieben. Lehm wird im Hochbau in unterschiedlichen Formen als Baumaterial eingesetzt beispielhaft als Lehmputz, Lehmstein, Stampflehm. Die Feuchtepufferung eines Baumaterials hängt von seinen Sorptionsvermögen sowie der Porosität ab. Die Zusammensetzung von Lehmbaustoffen ist hierbei aber entscheidend: die in Lehm enthaltenen quellfähigen Dreischichttonminerale haben einen direkten Einfluss auf die bauphysikalischen Eigenschaften. Sie bestimmen die Bildung des Porenraumes und das damit verbundene Verhalten der Adsorption von Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft und Feuchtespeicherung. Besonders quellfähige Tone können über große Mengen Feuchtigkeit in ihrem Kristallgerüst einlagern, sodass die Absorptionsmenge die Menge der Kapillarkondensation um ein Vielfaches übersteigt. Die Betrachtung der Absorptionskurven von typischen Lehmputzen und konventionellen Putzen im Bereich zwischen 40 bis 70% relativer Luftfeuchte zeigt, dass das Sorptionsvermögen des Lehmputzes etwa doppelt so hoch ist wie das eines Kalk- oder Kalkzementputzes (vgl. Figgemeier et al. 2010: 15-27)

Aufgrund des höheren Sorptionsvermögen besitzt Lehm somit die Eigenschaft, innerhalb kurzer Zeit Feuchtigkeit aufzunehmen und wieder abgeben zu können, und könnte somit prinzipiell kurzfristige Änderungen in der relativen Luftfeuchtigkeit mit geringer zeitlicher Verzögerung puffern.

#### 5.6.4.1 Trennwände des Ausstellungsbereichs

Anhand von Raumklimasimulationen werden Temperaturen und relative Feuchten der Innenluft im Ausstellungsbereich bei Variation der Trennwandkonstruktionen zwischen Ausstellungsraum und Open-Space-Bereich bzw. Depot untersucht. Die Gesamtfläche der hier betrachteten beiden Trennwände der Ausstellung beträgt ca. 900 m<sup>2</sup>; diese werden innerhalb der Studie entweder

- als 30cm Sichtbetonwand,
- als 60cm Stampflehmwand oder
- hybrid als 30cm Betonwand mit 2cm Lehmputz modelliert;

die restlichen raumabschließenden Oberflächen werden – wie im modernen Museumsbau häufig anzutreffen – aus Beton bestehend angenommen. Während der Öffnungszeiten sind ständig 20 Personen im Raum, was einen personenbedingten nichtkonditionierten Außenluftvolumenstrom von 400 m<sup>3</sup>/h durchgängig während der Öffnungszeiten von 10-18 Uhr bedingt. Abgesehen von einer komfortbedingten Beheizung auf 20°C wird keine weitere Temperierung oder Luftbehandlung innerhalb der Berechnungen angesetzt.



Abbildung 16: Ausschnitt vom Erdgeschoss Grundriss des geplanten Ausstellungsgebäudes

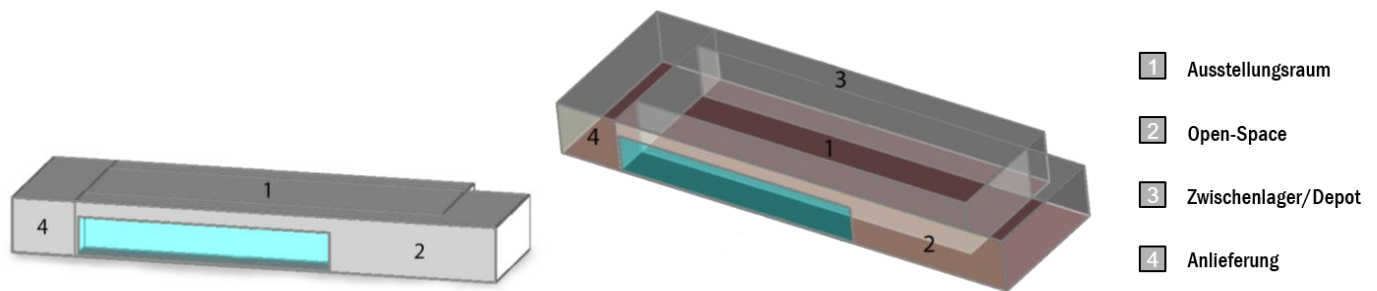


Abbildung 17: Außenansicht und Raumanordnung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus

Insgesamt lassen alle drei Innenwandkonstruktionen ein recht ausgeglichenes Raumklima erwarten, was angesichts der hier vorausgesetzten moderaten Besucherzahlen und der fehlenden solaren Lasten des fensterlosen Raums nur plausibel ist. Bei Massivwänden aus Beton bzw. Lehm werden aufgrund ähnlicher, sehr hoher Wärmespeichereigenschaften kaum Unterschiede der Innenlufttemperatur auftreten; bezüglich der relativen Innenluftfeuchte können etwas stärkere Abweichungen zwischen den Trennwandtypen auftreten, da die Feuchtespeichereigenschaft des Lehms deutlich höher einzuschätzen ist als die des Betons.

Im Winter sind die Temperaturverhältnisse im beheizten Ausstellungsbereich dank Beheizung zwar identisch, die dann geringe absolute Außenluftfeuchtigkeit führt jedoch im Gebäudeinneren zu sinkenden relativen Luftfeuchten, insbesondere im Fall von Beton-Trennwänden. Die feuchtepuffernden Eigenschaften des Lehms bewirken im Vergleich zur Betonwand Unterschiede der relativen Luftfeuchtigkeit von mehreren Prozentpunkten, was angesichts der Klimaanforderungen nach ASHRAE-Standard A1 nennenswert ist. Die lehmverputzten Betonwände verhalten sich kompromissartig, was durch Raumluftfeuchten im Bereich zwischen denen der Beton- und der Lehm-Trennwände mit der Tendenz zum Beton-Verlauf evident wird. Mit zunehmender Dicke der Lehmputzschicht verkleinert sich der Luftfeuchteabfall aufgrund des Luftwechsels mit trockener Außenluft. Im Fall der Betontrennwände führen steigende Außentemperaturen und –luftfeuchten zur Normalisierung der relativen Luftfeuchten im Raum; die Konstruktionen verhalten sich bei moderaten Außenklimabedingungen ähnlich. Der verbaute Lehm trägt klar zur Klimakonstanz im Raum bei winterlichen Temperaturschwankungen bei.

Auch während Sommerperioden beweisen alle Trennwandvarianten dank ihrer Massivität eine gute Temperaturkonstanz. Bei quasi identischen Lufttemperaturen lassen sich jedoch insgesamt gemäßigte Luftfeuchten bei der Verwendung von Stampflehm gegenüber Beton erwarten. Die Unterschiede betragen mehrere Prozentpunkte. Nach Abschluss der Heißwetterphase nähern sich die raumklimatischen Verhältnisse in allen Varianten wieder an. Die geringsten Klimaschwankungen im Sommer herrschen insgesamt bei der Stampflehmvariante.

#### 5.6.4.2 Wandstärken der Stampflehm-Trennwand

Auch wenn sich die Verwendung von wärme- und feuchtepuffernden Materialien wie Lehm im Innenausbau also positiv auf ein ausgeglichenes Raumklima auswirkt, besteht allgemein Unsicherheit in der Frage nach sinnvollen, d.h. thermisch-hygrisch aktivierbaren Bauteil- oder Schichtdicken. Wie oben aufgezeigt wurde, ist die Verwendung von Stampflehm als (tragendes) Trennbauteil raumklimatisch günstig. Innerhalb einer Parameterstudie wurden die raumklimatischen Auswirkungen von Trennbauteilen aus Stampflehm bei Wandstärken von 20 cm, 40 cm und 60 cm untersucht.

Insgesamt zeigt die Lehmwand mit der geringsten Dicke im Vergleich zur dicksten Ausführung zu jedem Außenklima die stärksten Schwankungen, wenn diese auch sehr klein sind. Diese Tendenz ist bei der Luftfeuchte etwas deutlicher ausgeprägt.

Wenn im Frühsommer die Außentemperaturen und die Sonnenscheindauer zunehmen, steigen auch die Innenlufttemperaturen im Ausstellungsbereich ohne zusätzliche Kühlmaßnahmen über das Soll-Niveau an. Dieser Anstieg ist bei der 20cm-Stampflehmwand am Größten, was mit der geringen Wärmespeichermasse (und dem etwas größeren Wärmedurchgangskoeffizienten zum hochverglas-ten Open-Space-Bereich hin) zu begründen ist. Aufgrund dieser höheren Innentemperatur ist die relative Luftfeuchtigkeit bei der dünnen Wand nun niedriger als bei den Vergleichswänden. Je länger das Sommerwetter andauert, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit eines Lufttemperaturanstiegs auch bei den anderen Varianten, bis diese in etwa auf gleichem Niveau liegen wie die dünnste Wand. Feuchtetechnisch sind die Unterschiede nun ebenfalls marginal, die Werte liegen wiederum bei der 20cm-Ausführung etwas höher, d.h. sind ganz leicht weniger konstant.

Mit sinkenden Außentemperaturen und absoluten Außenluftfeuchten und vermehrten Heizbetrieb treten die Luftfeuchteunterschiede der Berechnungsvarianten wieder deutlicher hervor: die Feuchte-werte bei dickeren Trennwänden sind höher und stabiler.

Zu Beginn der Kälteperiode und gleichbleibenden Innenraumtemperaturen infolge einer Beheizung ist die Innenluft bei der 20 cm-Lehmwand etwas trockener. Aufgrund der guten Feuchtespeicherfähigkeit des Lehms scheint die 60 cm dicke Lehmwand während dieser Zeit extrem niedriger absoluten Außenluftfeuchten, ein stärkeres Absinken der Innenluftfeuchte durch Feuchteabgabe teilweise zu verhindern. Von einem höheren Feuchteniveau kommend verharrt die Luftfeuchtigkeit eher, bis sich die die Witterungsverhältnisse wieder normalisieren. Die Innenluftfeuchteverhältnisse bei der Lehmwand mittlerer Dicke bewegen sich plausibel zwischen den Verläufen der dicken und der dünnen Wand.

Während einer Hitzeperiode lassen sich die Auswirkungen der drei Varianten kaum unterscheiden. Die Betrachtung der hygrischen Verhältnisse über die absolute Luftfeuchtigkeit zeigt bei starkem Außentemperatur- und Feuchteanstieg insgesamt eine leichte Zunahme der Luftfeuchte im Ausstellungs-bereich, die bei der 20 cm Wand etwas deutlicher (in der Größenordnung von  $0,2\text{g}/\text{m}^3$ , also 1-2% r.F.) ausfällt. Auf eine spekulative Interpretation der minimalen Unterscheide soll in diesem Rahmen verzichtet werden.

#### **5.6.4.3 Trennwandmaterial zur Feuchtepufferung**

Da Beton wie auch Stampflehm aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität schon hervorragende Materialien für den Museumsbau aus Sicht der Temperaturkonstanz darstellen, sollte in einer weiteren Gegenüberstellung von Berechnungsvarianten das Augenmerk allein auf die Feuchtespeicherfähigkeit der Bauteile gelenkt werden. Dazu werden die klimatischen Verhältnisse im Ausstellungsraum bei starker Frequentierung durch Besucher (mit entsprechenden personenbedingten Wärme- und Feuchtlasten und notwendigem personenbedingten Außenluftvolumenstrom für 80 Personen) und Annahme dreier unterschiedlicher massiver Trennwandaufbauten (an beiden Längsseiten), nämlich

- 30 cm dicke Trennwände aus schwerem Wandbildner (z.B. Beton) ohne Feuchtepufferfähigkeit bspw. bei Metallverkleidung, restliche Oberflächen ohne Feuchtepufferfähigkeit,
- 30 cm dicke Beton-Trennwände, alle restlichen Oberflächen Beton sowie
- 60 cm dicke Stampflehm-Trennwände, restliche Wandoberflächen mit Lehmputz, Holz-Tragwerk.



Hier zeigt sich, dass sich trotz sehr hoher Temperaturstabilität (dank hoher Wärmespeicherfähigkeit aller massiven Bauteile) die hygrischen Verhältnisse in der Ausstellung mitunter sehr stark in den untersuchten Varianten unterscheiden können.

In der Kältewoche fallen die relativen Luftfeuchten stark ab, da der Raum infolge des hygienisch notwendigen Luftwechsels mit sehr trockener Außenluft an Feuchte einbüßt. Das Modell mit Lehmoberflächen und –Bauteilen kann diesem Effekt die Feuchtespeicherfähigkeit des Materials entgegensetzen. Die Tagesschwankungen sind hier am Geringsten und auch die Durchschnittswerte der Luftfeuchtigkeit über die Woche beweisen hier den moderatsten Abfall. Während der 10-stündigen Öffnungszeiten mit starken Besucherverkehr steigen bei allen Varianten trotz des erhöhten personenbedingten Außenluftwechsels aufgrund der von den Menschen abgegebenen Feuchte die relativen Raumluftfeuchten wieder an. Die Zunahme über den Tag liegt bei der Variante ohne Feuchtepufferung bei bis zu 25 Prozentpunkten, bei Beton und Lehm sind es bis zu 10 Prozentpunkte. In der Hitzeperiode zeigt Lehm dem Beton gegenüber leichte Vorzüge in der Dämpfung der Feuchteschwankungen über den Tag. Der Anstieg über den Zeitraum der Museumsöffnung (10-18 Uhr) ist kleiner, das langfristige Verhalten ebenfalls günstiger, da das Luftfeuchteniveau bei der Lehmvariante geringer ist.

Betrachtungen zum Einfluss der raumoberflächenbildenden Materialien auf die Temperatur-, besonders aber auf die Luftfeuchteverhältnisse wurden darüber hinaus mittels eines Szenarios untersucht, nach dem stoßweise für eine Stunde 200 Besucher die Ausstellung besuchen. Der Luftwechsel wird in dieser „worst-case-Studie“ gleichbleibend mit nur 400 m<sup>3</sup>/h angesetzt, also nicht ad hoc aufgrund der hohen Besucherzahl vervielfacht, damit die Auswirkungen der personenbedingten Wärme- und Feuchtelasten im modellierten Raum bei den unterschiedlichen Materialien 30 cm Sichtbeton, 60 cm Stampflehm, 2 cm Gipsputz auf 30 cm Beton, 2 cm Lehmputz auf 30 cm Beton oder 30 cm Vollholz deutlich werden.

Keiner, der in dieser Parameterstudie für die komplette Innenoberfläche angenommenen Baustoffe vermag es, Schwankungen der Luftfeuchte oder Temperatur im Ausstellungsraum angesichts der sehr hohen Besucherdichte ganz zu verhindern. Im Winter bewirken die Besucher innerhalb der einstündigen Besucherspitze unabhängig vom Baustoffeinsatz eine Anhebung der Raumlufttemperatur um ca. 1K. Die relative Luftfeuchte steigt in dieser Zeit um rund 12 Prozentpunkte bei Beton mit oder ohne Gipsputz, um 10 bis 11 Prozentpunkte bei Lehmputz auf Beton und bei Vollholz (wobei diese bei Vollholz etwas schneller wieder abfällt) und um rund 8 bis 9 Prozentpunkte bei Stampflehm. Insgesamt ist, wie vorher bereits festgestellt, das winterliche Luftfeuchteniveau hier nicht so niedrig wie bei den anderen, weniger feuchtepuffernden Materialien.

Ein ganz ähnliches Bild ergibt sich in der Sommerwoche mit leichten Temperaturspitzen von 1 bis 2K Temperaturanstieg innen während der Stoßzeit und gleichzeitigem Anstieg der relativen Luftfeuchte, der in der Stampflehm-Variante geringer ausfällt als bei Holz und Lehmputz bzw. insbesondere bei reinen Sichtbeton oder Gipsputzoberflächen. Wiederum zeigen sich bei Stampflehm kurz- und langfristig die kleinsten Schwankungen der Luftfeuchte gepaart mit guter Temperaturstabilität, die vergleichbar ist, mit der von Beton.

## 6 Raum

### 6.1 Ausstellungsraum

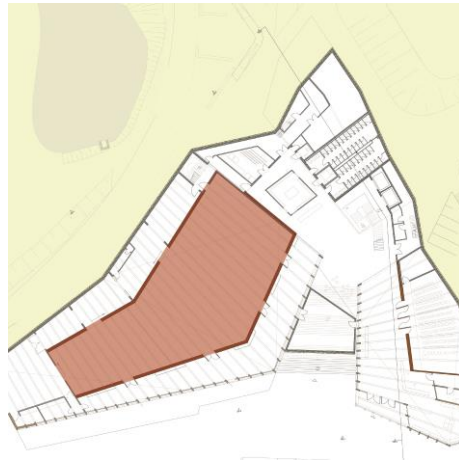


Abbildung 18: Ausstellungsraum

Der Ausstellungsraum bildet das Herzstück des Museumsneubaus und beinhaltet die historischen Ausstellungsstücke wie auch Kunstgegenstände. Er ist mit einer Ausstellungsfläche von ca. 885m<sup>2</sup> der größte Raum im Museum und hat aufgrund der großen Raumtiefe die höchsten baukonstruktiven Anforderungen an das Tragwerk. Aus konservatorischen Gründen ist der höchste museale Raumklima-Standard (ASHRAE-A1) im Ausstellungsraum erforderlich. Das bedeutet unter anderem, dass klimatische Kurzzeitschwankungen hinsichtlich der relativen Raumluftfeuchtigkeit auf maximal +/- 5% rh und bezüglich der Raumlufttemperatur von maximal +/- 2 K reduziert werden müssen. Unter kurzfristiger Schwankung ist jede Schwankung zu verstehen, die kürzer ist als die saisonalen Schwankungen (d.h. 30 Tage für Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit, 7 Tage für Temperaturschwankungen). Diese Grenzwerte stellen ganzjährig hohe Anforderungen an die raumlufttechnische Anlage.

**Boden:** Der Fußbodenaufbau kann in Form eines hoch belastbaren Hohlbodensystems ausgebildet werden, welches eine mögliche Nutzungsänderung und bauliche Veränderung der Ausstellungsfläche aufgrund einer flexibel anpassbaren Installationsführung (ELT) begünstigt. In die engere Auswahl des Oberfußbodenbelags kommen vorzugsweise hiesige Massivholz oder Natursteinprodukte. Alternativ können langlebige und pflegeleichte Kunststeinprodukte Anwendung finden.

**Wand:** Um Klimaschwankungen im Innenraum präventiv zu begegnen und die technische Klimaanlage passiv zu unterstützen, wird der Raum von einer massiven Stampflehmwand und mit (3cm dicken) Lehm verputzten Betonwänden umgeben. Die massiven Wandkonstruktionen ergänzen dank ihrer Wärmespeicherfähigkeit die leichte Dachkonstruktion aus Holz. Die Stampflehmwände verlaufen über die gesamte Raumbreite orthogonal zur Haupttragrichtung und ermöglichen als Auflager für das Holztragwerk eine Reduzierung der Querschnittsabmessung. Sie wirken aufgrund ihrer hygri-schen Speicherfähigkeit positiv auf die Stabilisation der relativen Feuchtigkeit im Innenraum.

**Tragwerk:** Mit dem Ziel der Errichtung eines CO<sub>2</sub>-neutralen Gebäudes sowie der Anknüpfung an historische traditionelle Bauweisen (Fachwerk-konstruktion) besteht die primäre und sekundäre Tragkonstruktion des Ausstellungsraums aus einem möglichst großen Anteil aus Vollholz aus nachhaltiger und regionaler Forstwirtschaft. Die Dimensionierung der Tragwerkselemente wird durch den ca. 24m tiefen Bereich des Ausstellungsraums bestimmt.

## 6.1.1 Raumklima

### 6.1.1.1 Besucherzahlen

Eine – wenn auch zweifelsohne gewünschte – Störgröße im Museum ist unter klimatischen Gesichtspunkten betrachtet jeder Besucher, weil er trockene und feuchte Wärme mit in die Räumlichkeiten trägt. Auch wenn Kleidung und Schuhe als trocken und „neutral“ vorausgesetzt werden, setzen Menschen bei mäßiger Aktivität im Stehen oder langsamen Gehen nach DIN 2078 170W an Wärmeleistung (40% Strahlung, 60% Konvektion) sowie 98g Feuchtigkeit durch Transpiration und Aspiration pro Stunde frei. Zudem benötigen die Besucher sauerstoffreiche Außenluft, sodass mit steigenden Besucherzahlen samt der eingetragenen menschlichen Wärme- und Feuchtelasten noch zusätzliche klimatische Beeinflussungen durch einen erhöhten Außenluftwechsel zu verzeichnen sind. Ist die Außenluft unkonditioniert, bedeutet dies je nach Jahreszeit die Zufuhr kalter, trockener oder auch warmer, feuchter Luft.

Innerhalb einer Parameterstudie wurden die Auswirkungen von 20, 80 und 200 Besuchern innerhalb der Öffnungszeiten von 10-18 Uhr auf das Museumsklima betrachtet. Der Personenabhängige Außenluftvolumenstrom in Höhe von 400, 1600 oder 4000 m<sup>3</sup>/h entspricht einem Außenluftwechsel von 0,06/h, 0,23/h oder 0,57/h. Der Ausstellungsraum besitzt die vorab betrachteten Stampflehmwände (60cm) und sonst Betonbauteile; Im Winter ist wie vorher eine Beheizung auf 20°C angesetzt.

Der Aufenthalt von durchschnittlich 200 Personen während der achtstündigen Öffnungszeiten bewirkt eine Schwankung der Luftfeuchte innerhalb von 24 Stunden um bis zu 18 Prozentpunkte, die der Lufttemperatur um 4K. Dabei stellt diese Besucherzahl eine Ausnahmesituation dar.

Bei 20 Besuchern über den Tag sinken die winterlichen Innenluftfeuchten um bis zu 3 Prozentpunkte ab, bei 80 um 8 bis 10. Im Sommer sorgen die inneren Lasten aufgrund von 20, 80 oder 200 Besuchern und erhöhte unkonditionierte Lüftung zu einem Anstieg der Innenlufttemperatur von unter 1 bis 2 bzw. 4K sowie der relativen Luftfeuchte von rund 3, 5 bzw. 8 Prozentpunkten. Diese Werte sind naturgemäß stark von den spezifischen Außenklimabedingungen an dem betreffenden Tag abhängig, darum sollen diese Schwankungsbreiten als ungefähre Vergleichswerte dienen.

### 6.1.1.2 Luftwechsel

Dass auch ohne zusätzlichen Besucherverkehr die Zuführung von Außenluft im Sommer wie im Winter erheblichen Einfluss auf das Innenklima nehmen kann, zeigt eine weitere Simulationsstudie. Der Ausstellungsraum besteht wie üblich aus Betonbauteilen mit Stampflehmtrennwänden und wird im Winter auf 20°C beheizt, eine sonstige Konditionierung findet nicht statt. Die konstanten Außenluftvolumenströme variieren zwischen 400 m<sup>3</sup>/h (= 0,057 h<sup>-1</sup>), 700 m<sup>3</sup>/h (=0,1 h<sup>-1</sup>) und 3500m<sup>3</sup>/h (= 0,5 h<sup>-1</sup>). Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass auch, wenn sich die Lufttemperaturen im Innern, d.h. maximal 1 bis 1,5K im Sommer erhöhen, ein hoher Außenluftvolumenstrom erwartungsgemäß entsprechend Einfluss auf die Feuchteverhältnisse im Raum nimmt: Im Sommer liegt die relative Luftfeuchte bei 0,5-fachen Luftwechsel mitunter 10 Prozentpunkte höher als bei 0,057-fachen Luftwechsel, im Winter 18 Prozentpunkte niedriger.

## 6.2 Zwischenlager



Abbildung 19: Materiallager

Das Zwischenlager (Magazin) dient der Aufbewahrung und Lagerung von Ausstellungsstücken und Kunstgegenständen. Aus diesem Grund weist der Raum, gleichermaßen wie der Ausstellungsraum, hohe konservatorische Anforderungen (ASHRAE-A1 Standard) an das Raumklima auf. Um die Ausstellungsstücke bei der Verlagerung von der Ausstellungsfläche in das Zwischenlager keinen raumklimatischen Schwankungen auszusetzen, sind die beiden Räume direkt miteinander verbunden.

**Boden:** Im Zwischenlager sind die Nutzungsanforderungen bezüglich der Medienführung innerhalb des Fußbodenaufbaus sowie die Ansprüche der besonders hochwertigen Oberflächenqualität weniger hoch. Schwerpunktartig liegen die Anforderung daher im Bereich der Belastbarkeit unter Einfluss der hohen Nutzlasten (bis zu 8 kN/m<sup>2</sup>). Daher ist in diesem Raum im Sinne der Suffizienz die Anwendung eines Sichtestrichs denkbar.

**Wand:** Die erdberührten Wände bestehen aus bauphysikalischen und konstruktiven Aspekten sowie hohen Sicherheitsanforderungen aus einer Betonwand. Die Wand zum Ausstellungsraum wird aus raumklimaregulierenden Aspekten aus einer tragenden Stampflehmwand gebildet, welche darüber hinaus als Auflager für das Holztragwerk fungiert. Raumunterteilende Trockenbauwände können aus Holzständerwänden mit Lehmbauplatten ausgebildet werden.

**Dach:** Die Raumtiefe von ca. 6,5m und die daraus resultierenden konstruktiven Anforderungen an das Dachtragwerk sind ähnlich hoch wie im Open Space. Das Dach besteht daher vorrausichtlich aus einem Tragwerk aus Vollholzprodukten.

### 6.3 Open Space



Abbildung 20: Open Space

Der Open Space ist der Vorraum des Ausstellungsraums. Er beinhaltet ebenfalls Ausstellungsstücke, die jedoch keine Anforderung an einen erhöhten raumklimatischen Standard mit sich führen. Dies erlaubt eine natürliche Belichtung und den daraus resultierenden Einfluss von solaren Erträgen in den Innenraum. Eine großzügige Verglasung in den Zwischenräumen der Kolonnade öffnet den Blick in die Landschaft des Teutoburger Waldes und lädt den Besucher zum Verweilen ein. Der Open Space dient zudem als Wandelhalle, die das Foyer mit dem Ausstellungsraum verbindet.

**Boden:** Die statisch konstruktiven Anforderungen an den Fußbodenaufbau im Open Space sind deutlich geringer als im Ausstellungsraum, sodass der gesamte Fußbodenaufbau schlanker ausgeführt werden kann. Da dieser Raum ebenfalls als Ausstellungsfläche dient, ist die Anwendung eines Hohlbodensystems ebenfalls denkbar. Um den architektonischen Gestaltungsvorsatz eines fließenden Fußbodenbelags in den repräsentativen Räumen des Museums realisieren zu können, orientiert sich die Auswahl des Oberbodenbelags im Open Space am Ausstellungsraum.

**Wand:** Die fassadenseitige Wand wird durch eine Kolonnade aus Holzstützen und wahrscheinlich dazwischen angeordneten wechselnder Holzleichtbau-Wänden und einer Verglasung gebildet. Ein möglicher Sonnenschutz aus Holzlamellen sorgt für eine Verschattung im Innenraum und wirkt der sommerlichen Überhitzung entgegen. Die Holzbauweise fügt sich in das konstruktive System des hölzernen Skelettbaus des Primärtragwerks ein. Sie trägt aufgrund der materiellen Zusammensetzung mit Ausnahme der Verglasung aus überwiegend nachwachsenden und energiearmen Rohstoffen zur Optimierung des ökologischen Fußabdrucks des Gebäudes bei. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich voraussichtlich eine massive Stampflehmwand, welche die ansonsten leichte Holzkonstruktion aufgrund der Masse und der thermischen und hygrischen Speicherfähigkeit ergänzt und eine Stabilisierung des Raumklimas bewirkt.

**Decke:** Die Dachkonstruktion wird voraussichtlich von einem Holztragwerk gebildet, welches auf der Fassadenseite auf die lastabtragenden Stützen trifft und auf der gegenüberliegenden Seite auf einer massiven Stampflehmwand aufliegt. Aufgrund der Raumtiefe von ca. 7,5m kann das Tragwerk anders als im Ausstellungsraum wahrscheinlich aus einem massiven Querschnitt aus Vollholz ausgebildet werden.

## 6.4 Zonen ohne konservatorische Anforderungen

### 6.4.1 Steigerung der Raumluftqualität durch Pflanzen

#### 6.4.1.1 Raumluftqualität am Arbeitsplatz

Im Laufe ihres gesamten Lebens atmen Menschen durchschnittlich 350.000 kg Luft ein - deutlich mehr als sie Nahrungsmittel und Wasser aufnehmen. Deshalb ist eine schadstoffarme Atemluft sowohl in Außen- als auch in Innenräumen für die Gesundheit und das Wohlbefinden überaus wichtig. Intensives Lüften mittels RLT oder Fensterlüftung steigert i.A. die Luftqualität, bringt jedoch Schwankungen der Raumlufttemperatur und -feuchte sowie erhöhte Kosten für Heizung und ggf. Kühlung mit sich. Eine „schonendere“ Möglichkeit das Raumklima zu verbessern, stellen dabei Zimmerpflanzen dar. Sie können die Luftfeuchtigkeit regulieren, Schadstoffe aus der Raumluft filtern und sogar das allgemeine Wohlbefinden beeinflussen.

Die allgemeinen luftreinigenden Eigenschaften von Zimmerpflanzen im Hinblick auf die Entfernung von Schadstoffen aus der Raumluft wurden bereits mehrfach belegt (vgl. NASA 1989, Wolverton 1993). Jede Pflanze besitzt zudem die Fähigkeit, Kohlenstoffdioxid zu fixieren und Sauerstoff zu produzieren; in welchem Maße dies bei Zimmerpflanzen erfolgt, ist jedoch weitestgehend unbekannt.

Teilziel unserer Untersuchung ist es daher, die Wirksamkeit von Zimmerpflanzen im Hinblick auf die Verbesserung des Innenraumklimas zu prüfen. In diesem Zusammenhang werden durch den Vergleich internationaler Forschungen sowie eigenständige Messungen geeignete Zimmerpflanzen zur Verbesserung der Raumluftqualität hinsichtlich der Schadstoffkonzentration und Luftfeuchtigkeit evaluiert.

Die Abgabe von Feuchte in einen Raum erfolgt häufig u.a. durch Zimmerpflanzen. Sie geben das durch Wurzeln aufgenommene Wasser nahezu vollständig durch Transpirationsvorgänge über ihre Spaltöffnungen (Stomata) ab. Dabei spielen die Beleuchtungsverhältnisse eine entscheidende Rolle. So geben Zimmerpflanzen bei eingeschränktem Lichtangebot durch Schließung der Spaltöffnungen weniger Feuchtigkeit ab als bei hoher Beleuchtungsstärke (vgl. Bischof et al. 2006: 109).

Die Gestaltung eines behaglichen Raumklimas z.B. in Büroräumen ist ein sowohl für das Wohlbefinden der Nutzer als auch für die Gesundheit wichtiger Aspekt. Die allgemeinen Richtwerte und Schutzziele beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten sind u.a. in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) definiert. Vor allem die ASR A3.5 *Raumtemperatur* und ASR A3.6 *Lüftung* sind für das Raumklima relevant.

Als Indikator für die Qualität der Raumluft dient Kohlenstoffdioxid. Lüftungsmaßnahmen werden demnach ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.000 ppm gefordert. Der allgemeine Arbeitsplatzgrenzwert von Kohlenstoffdioxid liegt bei 5.000 ppm (vgl. Technische Regeln für Gefahrstoffe. 2006: 34).

Die *DGUV* (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.) - *Informationen* enthalten Empfehlungen und praktische Anwendungshinweise für Arbeitsumgebungen aller Branchen. Für die Gestaltung von Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen gilt die DGUV Information 215-410 sowie DGUV Information 215-520. Insgesamt wird die Herstellung eines behaglichen Raumklimas mit folgenden Kriterien empfohlen: maximale relative Luftfeuchte von 50 %, Lufttemperatur von 20°C – 22°C sowie Luftgeschwindigkeit von 0,15 m/s. Dies entspricht den Vorgaben der ASR 3.5 und ASR 3.6.



Abbildung 21: Behaglichkeitsbereich im Büro

Obwohl in der heutigen Gesellschaft das Bewusstsein für ein gesundes Wohnklima weiter zu nimmt, gelangen viele Wohngifte unbemerkt in Innenräume durch neue Farben, Bodenbeläge oder Möbel. Der größte Emittent von Schadstoffen in Innenräumen ist der Mensch selbst, da die Produktion von CO<sub>2</sub> durch Atmung (und bestimmte Verbrennungsprozesse) die Qualität der Raumluft erheblich verschlechtert (vgl. Fiedler 2013: 7). Dabei spielt eine saubere, unbelastete Raumluft eine entscheidende Rolle für die Gesundheit und das allgemeine Wohlbefinden; denn mehr als zwei Drittel der Lebenszeit halten sich Menschen in Innenräumen auf (vgl. Umweltbundesamt, 2016a).

Kohlenstoffdioxid zählt zu den organischen Schadstoffen, gilt jedoch als Indikator für schlechte Raumluft. Neben dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Innenraumluft sind bestimmte Richtwerte für die Konzentration von Schadstoffen, die durch den Ausschuss für Innenraumrichtwerte festgelegt und regelmäßig überarbeitet werden, eine weitere übergreifende Hilfe zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen.

Während die Verwendung von schadstoffbelasteten Materialien immer stärker zurückgegangen ist und die meisten Baustoffe reglementiert wurden, wird der Luftqualität in Innenräumen weiterhin zu wenig Beachtung geschenkt. Um erhöhte Schadstoffkonzentration in der Raumluft zu vermeiden, sollte bei Neubauten und Sanierungen eine sorgfältige Auswahl emissionsarmer bzw. schadstofffreier Produkte erfolgen. Neben der Vermeidung von Schadstoffquellen ist ein regelmäßiger Luftaustausch ein wesentlicher Punkt für gesunde Raumluft.

#### 6.4.1.2 Raumlufthereinigende Pflanzen

Im Hinblick auf die luftreinigenden Eigenschaften von Zimmerpflanzen wurden in den vergangenen Jahren mehrere Studien erstellt. Zu den Bekanntesten zählen die NASA Clean Air Study sowie die Untersuchungen von Bill und John Wolverton. Die Studien bezogen sich dabei auf die Entfernung von Chemikalien wie Benzol, Xylol und Formaldehyd aus der Raumluft und geben keine weiteren Aufschlüsse über die CO<sub>2</sub>-Bindungskapazität.

Zusätzlich dazu wurden die luftreinigenden Eigenschaften der Blumenerde und der darin enthaltenen Bodenorganismen (vor allem Bakterien) ohne Pflanzen geprüft. Es konnte festgestellt werden, dass der Wurzelbereich der effizienteste Bereich zur Entfernung von Chemikalien aus der Luft ist (vgl. NASA 1989: 18).

Zu den bestbewerteten Zimmerpflanzen gehören z.B. *Dypsis lutescens* – Goldfrucht Palme, *Rhapis excelsa* – Steckenpalme, *Chamaedorea seifrizii* – Bambuspalm, *Ficus robusta* – Gummibaum, *Dracaena deremensis* 'Janet Craig' – Drachenbaum sowie *Hedera helix* – Efeu.

#### 6.4.1.3 Eigene Untersuchungen von Zimmerpflanzen zur CO<sub>2</sub>-Fixierung im Teststand

Die Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Fixierung fand an 12 Arten von Zimmerpflanzen in einem nahezu luftdichten Behälter statt, mit einem Gesamtvolumen von ca. 0,25 m<sup>3</sup> und den Abmessungen 1m x 0,5m x 0,5m. Die Lufttemperatur während der Untersuchungen betrug im Durchschnitt 21°C, die relative

Luftfeuchtigkeit > 75 %. Darüber hinaus wurde eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration (zwischen 3.000 bis 4.000 ppm) im Behälter hergestellt.

Für eine ausreichende Versorgung mit Licht wurden die Zimmerpflanzen während der Tag-Perioden mit einer LED-Lampe (Lichtfarbe: kalt-weiß, 6.500 K) beleuchtet, welche nahezu das gesamte Spektrum des sichtbaren natürlichen Lichts (390-780 nm) umfasst.

Um die CO<sub>2</sub>-Fixierrate und -Abgabe der einzelnen Zimmerpflanzen erfassen zu können, wurde eine Tag- und Nacht-Phase in dem Behälter simuliert. Die gesamte Messung dauerte 24 Stunden, die einzelnen Phasen jeweils 12 Stunden. Während der Tag-Phase wurden die Pflanzen zusätzlich mit einer LED-Lampe beleuchtet, um möglichst gleiche Lichtverhältnisse zu schaffen. Nach 12 Stunden wurden die Lampen ausgeschaltet und der Behälter wurde für weitere 12 Stunden abgedunkelt. Näheres zur Durchführung der Test sowie die Ergebnisse sind im Anhang zu finden.

Bergpalme und Einblatt gehören mit Abstand zu den effektivsten Pflanzen im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Fixierung. Im Gegensatz zu den restlichen Zimmerpflanzen konnte bei ihnen zusätzlich eine CO<sub>2</sub>-Abnahme während der Nacht-Periode verzeichnet werden.

Die Efeutute und die Grönlilie weisen mit 5 % sowie der Drachenbaum mit 7 % eine ebenfalls gute Bilanz auf. Insgesamt konnte den meisten untersuchten Zimmerpflanzen eine Tendenz zu einer Abgabe von etwa einem Drittel des aufgenommenen CO<sub>2</sub> beobachtet werden.

#### **6.4.1.4 CO<sub>2</sub>-Messungen im Raum**

Die CO<sub>2</sub>-Fixierung der Zimmerpflanzen sollte nun in einem genutzten Zwei-Personen-Büro (Volumen ohne Einrichtung: 73,57 m<sup>3</sup>) an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Lemgo gemessen werden. Der Büroraum ist an fünf Tagen in der Woche von zwei Personen ab ca. 8:00 Uhr bis 18:30 Uhr besetzt. Die Außenlufttemperaturen schwankten zwischen -2°C und + 11,5°C. Die durchschnittliche Temperatur betrug ca. 5°C.

Um das Lüftungsverhalten erfassen zu können, wurden an zwei Fenstern Reed-Kontakte angebracht, die das Öffnen und Schließen der Fenster genau dokumentieren, zusätzlich wurden Klima- und CO<sub>2</sub>-Werte in Fensternähe (Logger A) und am Arbeitsplatz (Logger B) gemessen.

Die erste Messreihe wurde ohne die zweite mit parallel 13 unterschiedlichen Zimmerpflanzen (Höhe 20 bis 200 cm) durchgeführt. Dabei sollte das Nutzerverhalten (z.B. Lüftungsverhalten) während der Messperioden nicht verändert werden, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse erhalten zu können.

Anhand der folgenden Abbildung ist zu erkennen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Büro während der Messtage mit Zimmerpflanzen schneller gesunken ist als an denen ohne Pflanzen. Somit konnte eine positive Wirkung von Zimmerpflanzen bezüglich des CO<sub>2</sub>-Abbaus nachgewiesen werden.



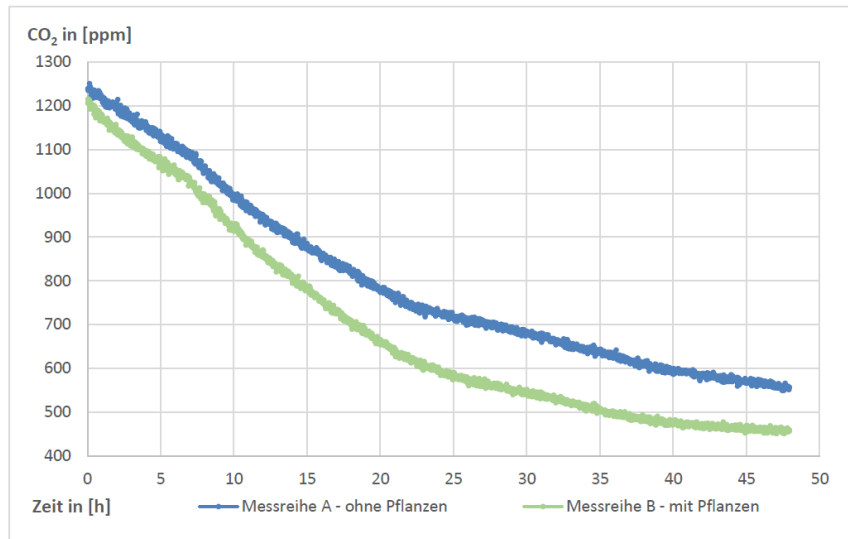


Abbildung 22: Vergleich beider Messreihen über einen Zeitraum von 48 Stunden

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration und Pflanzen treffen:

- Zimmerpflanzen reduzieren die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft, jedoch geschieht dies langsam
- Es ist keine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration durch den Gasaustausch von Zimmerpflanzen in den Morgenstunden zu erwarten
- Zimmerpflanzen können als CO<sub>2</sub>-Pufferspeicher betrachtet werden: am Tag nehmen sie CO<sub>2</sub> auf, in der Nacht geben sie einen Teil wieder ab

#### 6.4.1.5 Kühleffekt der Zimmerpflanzen

Pflanzen im Innenraum beeinflussen auf verschiedene Arten das Raumklima und das daraus resultierende (thermische) Komfortempfinden der Raumnutzerinnen und -nutzer. Neben der raumakustischen Wirkung, der Luftreinigung von CO<sub>2</sub> sowie weiteren Schadstoffen und nicht zuletzt der psychologischen Wirkung durch Anwesenheit von „Leben und Begrünung“ ist besonders die durch die Pflanzen hervorgebrachte adiabate Kühlung im Sommer hervorzuheben. Die von der Pflanze bzw. dessen Substrat abgegebene Feuchtigkeit verdunstet und entzieht der Umgebung die für diesen Phasenübergang nötige Energie. In der Folge kühlt die Umgebung entsprechend ab, ähnlich wie beim Schwitzen eines Menschen.

In einer Simulationsstudie (mit Wufi Plus (v3.2.0.1)) wurde untersucht, wie groß der Effekt der adiabaten Kühlung im Fall von Büroräumen sind, exemplarisch wird hier der Grundriss der Büros (196m<sup>2</sup> Grundfläche) im geplanten Neubau für das LWL-Freilichtmuseum in Detmold ist.

Es wurde angenommen, dass unter den Büros Räume mit ähnlichem Innenklima angeordnet sind und als Trennfläche eine Betondecke mit 12 cm Fußbodenaufbau fungiert. Die Außenwände wurden als Holzleichtbau modelliert. Angelehnt an Abbildung 23 wurden die nordost- und südwestorientierten Fassaden als dreifachverglast ohne Verschattung angenommen. Die Büros wurden mit einer internen Last von je zwei Büroarbeitenden besetzt. Die Innenraumluft wurde mit einer Heizungsanlage auf 20°C konditioniert. Eine weitere aktive Kühlung wurde nicht implementiert. Es wurde ein 0,1-facher Infiltrationsluftwechsel vorgesehen ohne eine weitere natürliche oder mechanische Lüftung, zum einen da Fensterlüftung bei Hitzeperioden ohnehin zu reduzieren ist, zum anderen um

die Kühleffekte der Pflanzen (ohne zu große Störwirkung durch Lüftung mit Außenluft) sichtbar zu machen.

Das organische Material der Innenraumpflanzen wurde als Sedum-Substrat implementiert. Dieses wird in der Software-Bibliothek mit einer detaillierten Feuchtespeicherfunktion geführt. Die Feuchteabgabe von Pflanzen im Innenraum wird typischerweise bei ingenieurmäßigen Betrachtungen mit 10 - 20 g/h pro Pflanze angegeben (vgl. Dönch 2000). Allerdings wird auch angemerkt (vgl. Künzel 2006), dass diese Werte primär aus Messungen von Pflanzen aus einem natürlichen Standort resultieren und nicht für Innenraumverhältnisse gelten. Die vorgestellten Messungen haben gezeigt (vgl. Künzel 2006), dass diese deutlich niedriger sind. Für diese Simulationsstudie wurde darum empfohlen (vgl. Künzel 2006), ein Feuchteeintrag von 0,6 g/h in der Nacht und von 2 g/h pro Pflanze tagsüber gewählt. Dies entspricht der Feuchteabgabe eines ca. 25 cm großen Hibiskus. Pro Büro wurden je 8 Pflanzen angesetzt und 16 weitere im Flur.

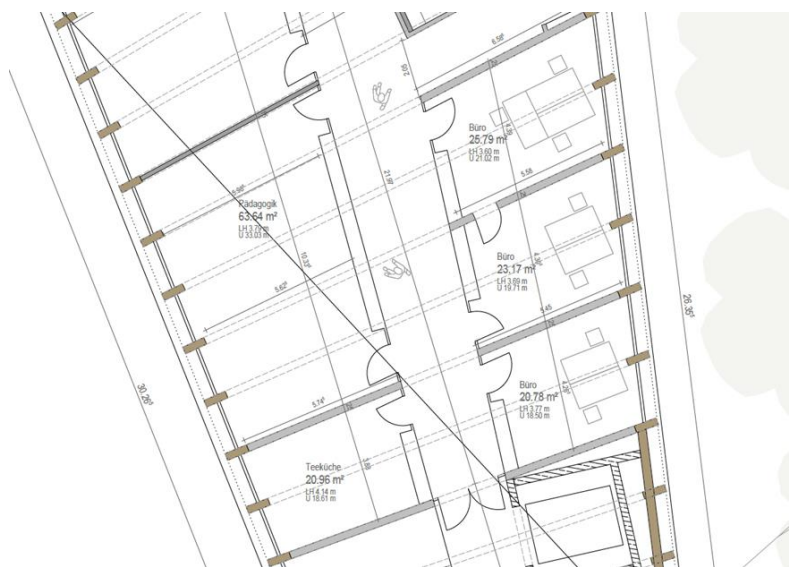


Abbildung 23: Die Büroräume im 2. OG des geplanten Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des Detmolder Freilichtmuseums

Die formulierten Randbedingungen eines minimalen, nur Infiltrationsbedingten Luftwechsels sowie die fehlende Verschattung führen erwartungsgemäß zu hohen Innentemperaturen und hohen Luftfeuchten im Bürobereich im Sommer, da gemäß dem gewählten Ansatz weder (solare) Wärmelasten noch Feuchtelasten abgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch klar die Kühlwirkung infolge Verdunstungsvorgänge an den Pflanzen sowie am Substrat.

Es zeigt sich während einer typischen Sommerwoche, dass bei Innenraumbegrünung um zwei bis drei Kelvin geringere Raumlufttemperaturen erreicht werden. Damit lässt sich ein signifikanter Kühleffekt durch adiabate Kühlung feststellen.

Ein weiterer Untersuchungsaspekt war die jeweils benötigte Heizenergie für die verschiedenen Szenarien. Für die „nackten“ Büros ohne Innenraumbepflanzung sind für dieses Szenario eine Heizenergie von 12.854 kWh im Jahr nötig. Bei Bepflanzung, wie beschrieben, steigt die benötigte Heizenergie auf 14.045 kWh, um der (im Sommer erwünschten) Verdunstungskälte in der Heizperiode entgegenzuwirken.

Weitere Simulationen zielten auf die Klimaverhältnisse in der Bürozone bei Aktivierung einer hohen Nachtlüftung mit 5-fachem Luftwechsel zwischen 22 und 8 Uhr ab. Tagsüber wird nur vom Infiltrationsluftwechsel (0,1/h) ausgegangen. Zudem wird hier eine konstante Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrades von Verglasung und Verschattung  $g_{total}$  von 0,4 (Dreifach-Verglasung in

leichter Sonnenschutz-Qualität) auf 0,15 (zusätzliche außenliegende Verschattung) angenommen. Es zeigt sich am Beispiel der betrachteten Sommerwoche, dass die Innenlufttemperaturen dank Nachtlüftung und Verschattung im komfortablen Bereich liegen. Die Pflanzen selbst bringen eine Temperaturabsenkung durch ihre adiabate Kühlwirkung von ca. 0,6K. Deutlicher werden die Unterschiede zwischen der nichtbegrünten und der begrünter Bürozone jedoch bezüglich der sich einstellenden relativen Luftfeuchtigkeit. Während der 14-stündigen Tagphase ohne aktive Lüftungstätigkeit steigt die relative Luftfeuchte infolge der pflanzlichen Verdunstung um rund 15% an. Diese Feuchtigkeit wird nachts bei hohem Luftwechsel wieder aus dem Gebäude hinausgeführt.

Allgemein lässt sich feststellen, dass im Innenraum platzierte Pflanzen eine Kühlung der Raumluft bewirken, dies jedoch in der Heizperiode mit einer Erhöhung der benötigten Heizenergie einhergeht. Die Ausweitung der Simulationen, ausführliche Labormessungen und vor allem ein langfristiges Monitoring von Vergleichsräumen mit und ohne Grünpflanzen schafft forschungsseitig die Grundlagen für die Beurteilung dieser natürlichen Klimatisierungsmethode.

#### **6.4.2 Adaptive Komfortsysteme als Alternative oder Ergänzung zum Hauptklimatisierungssystem**

Der thermische Komfort ist eine subjektive Wahrnehmung, die aus physischen bzw. psychischen Gründen variiert. Darum es ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die thermische Zufriedenheit aller Individuen gleichermaßen zu erreichen (vgl. Wang et al. 2018: 181-193). Wie in Fanger beschrieben (vgl. Fanger 1970: 14), gibt es mehrere Variablen, die einen deutlichen Einfluss auf die thermische Komfortempfindung haben. Dazu gehört der Energieumsatz des Körpers auf Grund der Stoffwechselprozesse, die externe Arbeit (von Art der Aktivität abhängig), die Bekleidung, die Lufttemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die mittlere Strahlungstemperatur und die Luftgeschwindigkeit. Adaptive Komfortsysteme (AKS) berücksichtigen die individuelle thermische Wahrnehmung und ermöglichen eine aktive Anpassung der lokalen Mikroklimazonen einer Person, ohne das Mikroklima anderer Personen im selben Raum zu beeinflussen (vgl. Kim et al. 2019: 2). Adaptive Komfortsysteme können somit als Alternative oder Ergänzung zum Hauptklimatisierungssystem eine wichtige Funktion für mehr Komfort und Energieeinsparung übernehmen.

Die Anwendung von AKS ermöglicht Energieeinsparungen, da sich der Toleranzbereich der Nutzer bezüglich der Raumtemperatur deutlich ausweitet. Dieser kann sich auf einen Temperaturbereich von 18 bis 30°C (vgl. Hoyt et al. 2009: 1) erweitern, im Vergleich zu dem in DIN EN 15251:2012-12 empfohlenen Temperaturbereich von 20-26°C (vgl. DIN EN 15251 2012: 5). Die Energieeinsparung ergibt sich dann aus dem reduzierten Anspruch an das Hauptklimatisierungssystem (HKS), welches einen deutlich höheren zusätzlichen Energieverbrauch als das AKS im Zusatzbetrieb hätte.

AKS können in der Ausführung je nach Art und Örtlichkeit des betrachteten Arbeitsplatzes viele unterschiedliche Formen annehmen. Infrarotlampen, Strahlheizpaneele und Ventilatoren sind unter anderem typische Elemente, welche - einzeln oder in Kombination - AKS bilden. Die Steuerung dieser Systeme soll den Nutzern Anpassungsfähigkeiten für die Erzielung des persönlichen thermischen Komforts bieten. Für eine optimierte Wirkung konzentrieren AKS ihren Einfluss auf die Bereiche des Körpers, in denen die Wahrnehmung des thermischen Komforts am größten ist. Dazu gehört der Kopf, die Hände oder der Unterkörper. Gegenwärtig stehen zahlreiche Studien zur Anwendung von AKS zur Erreichung von thermischem Komfort und Energieeinsparung zur Verfügung.

Ein Beispiel dafür ist die 6-monatige Feldstudie zur Anwendung von Infrarotfußwärme, die zur Wintersaison an 16 Arbeitsplätzen in einem Büroraum der University of California Berkeley geführt wurde (vgl. Zhang et al. 2015: 233-234). Die Ergebnisse der Studie zeigen beim Heizen eine Energieeinsparung zwischen 38% und 75% bei 100-prozentiger thermischer Zufriedenheit der Nutzer.

Der zusätzliche Energieverbrauch der Fußwärmer lag zwischen 3 und 21W pro Person und pro Stunde im Vergleich zu den 500 bis 700W der Energieeinsparungen durch die Reduzierung des HSK.

Eine andere Möglichkeit besteht in der Anwendung von Strahlungspaneelen zum Heizen oder Kühlen. Dies kann durch kleine Elemente unter dem Schreibtisch oder durch größere Elemente in Form von Wand-, Fußboden- oder Deckenpaneelen erfolgen (vgl. Baumann et al. 1997: 5-8). Bei der Nutzung von Strahlungspaneelen muss man versuchen, die Asymmetrie der Strahlungstemperatur sowie den Vertikalgradient der Temperatur zu reduzieren, da diese zu Diskomforteindrücken führen können (vgl. Alban 2010: 3,7-8).

Strahlungspaneel können für die Installation in unbeheizten Kontrollgebäuden auf dem Museumsgelände besonders interessant werden, weil es hier um eine intermittierende Nutzung geht. Solche schnellansprechenden Heizpaneel sind nicht wie herkömmliche Strahlungsheizsysteme konzipiert, um das Raumklima zu verändern, sondern nur um eine schnelle Wirkung auf die Nutzer zu haben. Dazu wurde eine Feldstudie von Richard D. Watson geführt, in welcher dieses System als Alternative zum herkömmlichen Strahlungsheizsystem (für diese intermittierende Nutzung ungeeignet) Energieeinsparungen und verbesserten thermischen Komfort ermöglichte (vgl. Watson et al. 1998: 1106-1111).

Bei warmen Temperaturen kann die Nutzung von gerichteten steuerbaren Ventilatoren die Raumtemperatur komfortabel halten, da die Luftgeschwindigkeit in direktem Bezug zur Verdunstung und Schweißproduktion steht. Hierbei spielt die relative Feuchtigkeit der Luft auch eine große Rolle, denn je trockener die Luft ist, desto wirksamer ist der Kühlungseffekt durch Verdunstung (vgl. Glahn 2016: 21ff). Diesbezüglich führte das Center for the Built Environment (CBE) eine Studie im Juni 2012 durch (vgl. Zhai et al. 2013:1-9). Die Tests erfolgten in einem Versuchsraum mit Temperaturen von 16, 28 und 30°C und einer relativen Feuchtigkeit von 60% und 80%. Insgesamt wurden 16 Probanden in Gruppen von 4 Personen nach thermischem Komfort bzw. der perzipierten Luftqualität getestet. Bis zu einer Temperatur von 30°C und 60% Luftfeuchtigkeit wurde der thermische Komfort gewährleistet. Die durchschnittliche Energie der Ventilatoren lag bei nur 10 W pro Person und pro Stunde.



Abbildung 24: Testgruppe und Messgeräte [Zhai et al. 2013: 110]

Bei der Nutzung von Ventilatoren als adaptives Kühlungssystem sollte laut Schiavon und Melikov die operative Temperatur durch erhöhte Luftgeschwindigkeit nicht mehr als 3K über der Grenze der Komfortzone angehoben (vgl. Schiavon/ Melikov 2008: 2) und die Luftgeschwindigkeit nicht höher als 0,8 m/s werden, da bei höheren Luftgeschwindigkeiten Zugerscheinungen auftreten können (vgl. Glahn 2016: 24ff). Diese Werte stimmen mit der Empfehlung der DIN EN ISO 7730 (siehe Abbildung

G.1, DIN EN ISO 7730) von einer maximalen Luftgeschwindigkeit von  $< 0,82 \text{ m/s}$  und einer maximalen Temperaturkorrektur von  $< 3\text{K}$  überein.

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von mehreren adaptiven Elementen. Dies untersucht eine weitere Studie des CBE bei der Entwicklung eines sogenannten „task-ambient conditioning(TAC)-Systems“ (vgl. Zang et al. 2009: 1). Das TAC-System kombiniert Infrarotfußwärmer, Handwärmer (geheizte Tastatur und Handauflagefläche), Kopfventilation und Handkühlung mit einer nachgewiesenen maximalen Leistung beim Kühlen von 41W und beim Heizen von 59W.

Die Tests erfolgten in einem Versuchsraum, in welchem die Temperatur zwischen 18 und 30°C variierte und die Sommer- und Wintersaison von drei Städten (Fresno, Oakland und Minneapolis) mit unterschiedlicher Klimatologie simuliert wurde. Insgesamt wurden 90 Versuche geführt, in denen 18 Probanden teilgenommen haben. Letztendlich wurde die thermische Wahrnehmung in allen Versuchen als akzeptabel empfunden und dabei durch Kühlung ein effektiverer Komfort als durch Heizen erzielt. Es wurde über das Jahr eine rechnerische Energieeinsparung von bis zu 40% bei einer Raumtemperatur zwischen 18 und 30°C und bis zu 30% bei Temperaturen zwischen 20 und 28°C ermittelt (vgl. Zhang et al. 2009: 1-10).



Abbildung 25: TAC (Tastatur, Infrarotfußwärmer und Kopfventilation) [Zhang et al. 2009: 2]

Adaptive Komponenten besitzen teilweise sowohl eine Wärme- als auch Kühlungsfunktion. In den „Personal Comfort Systems (PSC) Chairs“ von der University of Berkeley sind Wärmestreifen und Ventilatoren integriert (vgl. Kim et al. 2019: 1-16). Die PSC Chairs wurden schon bei mehreren Labor- und Feldstudien als erfolgreich getestet und die letzten Versionen davon konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung und Perfektionierung der Steuerung- und Monitoringsysteme.

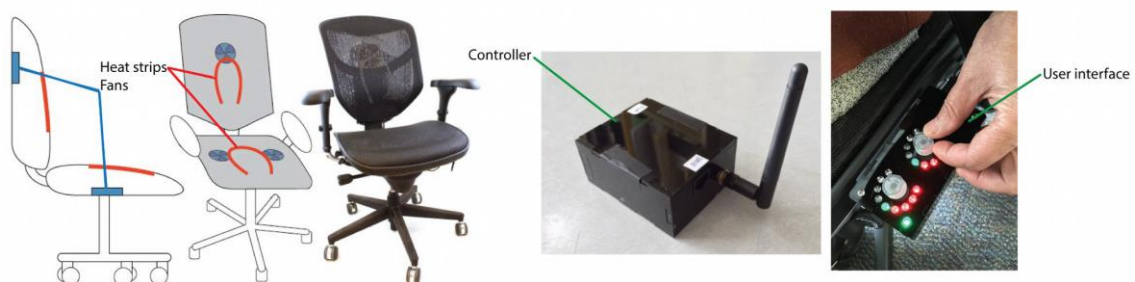


Abbildung 26: PSC Chairs mit User Interface [Kim et al. 2019: 3]

Die PSC Chairs wurden in einer Feldstudie in dem Sam Mateo County Bürogebäude in Redwood City in Kalifornien untersucht. Die Studie mit 37 Probanden erfolgte in der wärmeren Saison von April bis Oktober 2016. Die thermische Zufriedenheit der Nutzer liegt bei 96% bei normalen Bürottemperaturen (21.9-25.3 °C). Die Wärme- und Kühlfunktionen der Stühle wurde im Durchschnitt 76% der Nutzungszeit verwendet. Das Verhältnis zwischen Wärme- und Kühlfunktionen war jedoch sehr unterschiedlich. Dies verdeutlicht die unterschiedlichen individualthermischen Präferenzen bei gleichem Raumklima. Diese Ergebnisse liegen deutlich höher als die geforderten 80% von thermischer Zufriedenheit der „ASHRAE thermal comfort Standard“. In vorherigen Laborversuchen von W. Pasut

der PSC Chairs wurde eine 90-prozentige thermische Zufriedenheit bei Raumtemperaturen zwischen 18 und 29 °C mit einem Verbrauch von 16W beim Heizen und 3,6W beim Kühlen erzielt (vgl. Pasut et al. 2016: 10-21).

Um AKS als energiesparende bzw. komfortverbessernde Maßnahme für ein Museumsgelände zu planen, wird jeder zu betrachtende Arbeitsplatz in Bezug auf Aktivität, Bekleidungsfaktor und Raumklima definiert. Dabei sind je nach Raumsituation die klimatisierten oder nicht klimatisierten Teile des Gebäudes immer eigenständig zu berücksichtigen. Sobald dies erledigt ist, kann man sich auf die zahlreichen Erfahrungen von Simulationen, Labor- und Feldstudien bezüglich der Anwendung von AKS stützen (hier insbesondere Literaturstudien von M. N. Alban und von H. Zhang), um einen zweckmäßigen Aufbau zu entwickeln und zu konkretisieren (vgl. Alban 2010; Zhang et al. 2015: 15-41).

## 7 Gebäudestruktur

### 7.1 Funktionale Gliederung des Museumskomplexes

#### 7.1.1 Ausgangssituation

Der Neubau markiert den Übergang zwischen der öffentlichen Erschließungsseite und dem weitläufigen Gelände des Freilichtmuseums. Eine großzügige Freitreppe, die zwischen den Gebäudekörpern das hügelige Gelände erschließt, stellt metaphorisch einen Durchgang in eine vergangene Zeit dar. Die drei Baukörper des skulpturalen Ensembles leiten den Besucher wie „Trittsteine“ auf das Museumsgelände und fügen sich dabei harmonisch und sensibel in die hügelige Landschaft des Teutoburger Waldes ein. Dabei folgen die Höhen und polygonalen Dachformen der Baukörper spielerisch dem ansteigenden Gelände.

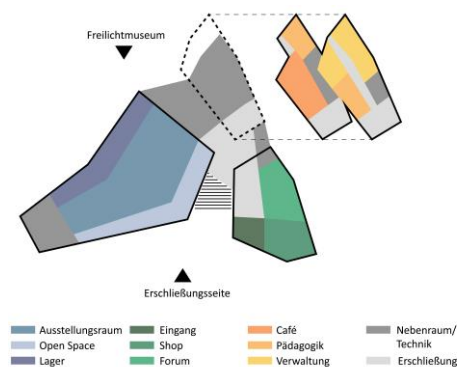


Abbildung 27: Aufteilung in Nutzungseinheiten

#### 7.1.2 Funktionale Gliederung

Um die Gebäudestruktur zu optimieren, wird das Ensemble in verschiedene Baukörper und Zonen unterteilt, die hinsichtlich der Nutzung sowie Anforderungen an das Raumklima, den Tageslichtbedarf und solare Erträge zusammengehören. Aus diesen Anforderungen resultieren drei übergeordnete Nutzungseinheiten:

1. Das Eingangsgebäude bietet dem Nutzer mit einem großräumigen Foyer verschiedenste Nutzungsszenarien und wird durch ein abtrennbares Forum als multifunktionalen Vortragssaal sowie nutzungsrelevanten Funktionsbereichen ergänzt.

2. Das Ausstellungsgebäude besteht im Kern aus dem musealen Ausstellungsraum und den dazugehörigen Funktionseinheiten aus Lagerbereichen, Präparationsräumen und Werkstätten. Diese Räume beinhalten das Ausstellungsgut und haben daher die im musealen Kontext höchsten Anforderungen an ein gleichbleibendes Raumklima (ASHRAE-A1 Standard).

3. Der dritte Baukörper, das Servicegebäude, hat eine kleinteiligere Raumstruktur und beherbergt pädagogische, gastronomische und administrative Nutzungen, die eng mit dem Museumsbetrieb verbunden sind. Diese Funktionseinheit hat einen hohen Tageslichtbedarf und erstreckt sich daher, aufbauend auf einen unterirdischen Techniksockel im Erdgeschoss über zwei Vollgeschosse oberhalb des ansteigenden Geländeniveaus.

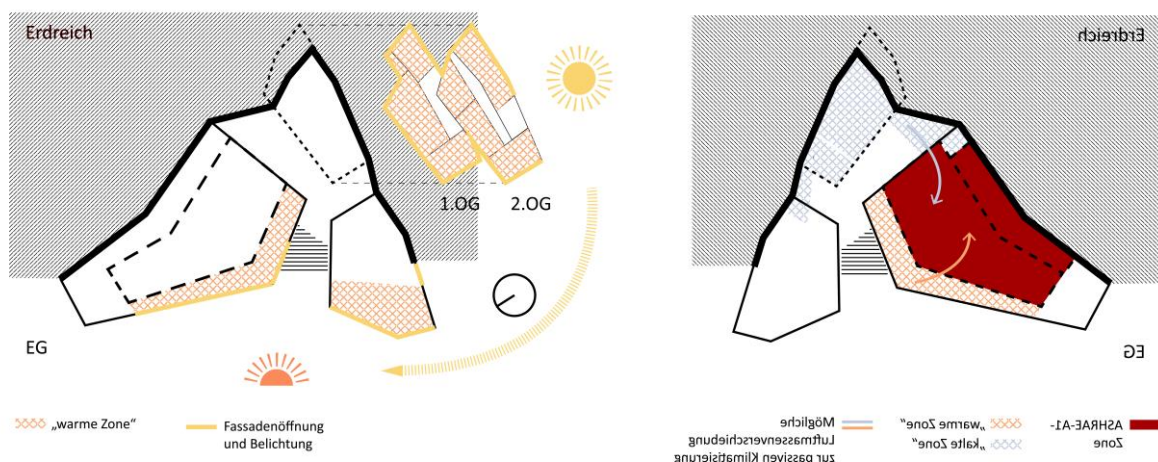


Abbildung 28: Ausrichtung und Positionierung auf Grundstück und Gelände

Abbildung 29: Passive Klimatisierung durch von „kalten“ und „warmen“ Zonen

### 7.1.3 Anordnung

Der Erschließungsseite des Museumsgeländes wird das Eingangs- und Ausstellungsgebäude zugeordnet. Um die funktionalen Anforderungen dieser Einheiten durch bauliche Maßnahmen zu optimieren, passt sich die Gebäudestruktur den geografischen Gegebenheiten an und schiebt sich im Erdgeschoss zu einem Teil in das hügelige Gelände. Dadurch ergibt sich eine „kühle“ und unbelichtete Zone und eine belichtete und „warme“ Vorderseite des Gebäudes. Zur Vermeidung von raumklimatischen Schwankungen durch solare Erträge wurde der Hauptraum der Ausstellung von der Fassade getrennt und eine Pufferzone, der Open Space, ausgebildet. Die Temperaturamplitude der beiden Zonen soll durch eine passive Klimatisierung, das Verschieben von warmen und kalten Luftschichten, genutzt werden und die technische und energieintensive Klimatisierung des Ausstellungs- und Lagerraums entlasten. Der Erschließungsseite, welche über die gesamte Gebäudehöhe belichtet werden kann, sind die repräsentativen Räume wie der Eingangsbereich, der Museumsshop sowie die „Solare-Pufferzone“ des Ausstellungsraums zugeordnet.

Die Hauptfassade ist nach Nord-West ausgerichtet, sodass solare Erträge reduziert werden und trotz der großzügigen Öffnung eine sommerliche Überhitzung des Innenraums möglichst reduziert wird. Der Baukörper des Servicegebäudes befindet sich, anders als das Ausstellungs- und Eingangsgebäuden, in seiner gesamten Kubatur über der Geländeoberfläche und erstreckt sich über zwei Vollgeschosse.

Die exponierte Hanglage ermöglicht eine allseitige Belichtung. Aufgrund der Zonierung gemäß des Tageslichtbedarfs sowie der räumlichen Anordnung der Baukörper im und auf dem Gelände kann gezielt und der Nutzung folgend die Fassade mittels Verglasung geöffnet werden. Dadurch wird sehr bewusst mit dem energieintensiven Baustoff Glas umgegangen und zielorientiert Licht und Wärme in den Innenraum gelassen.

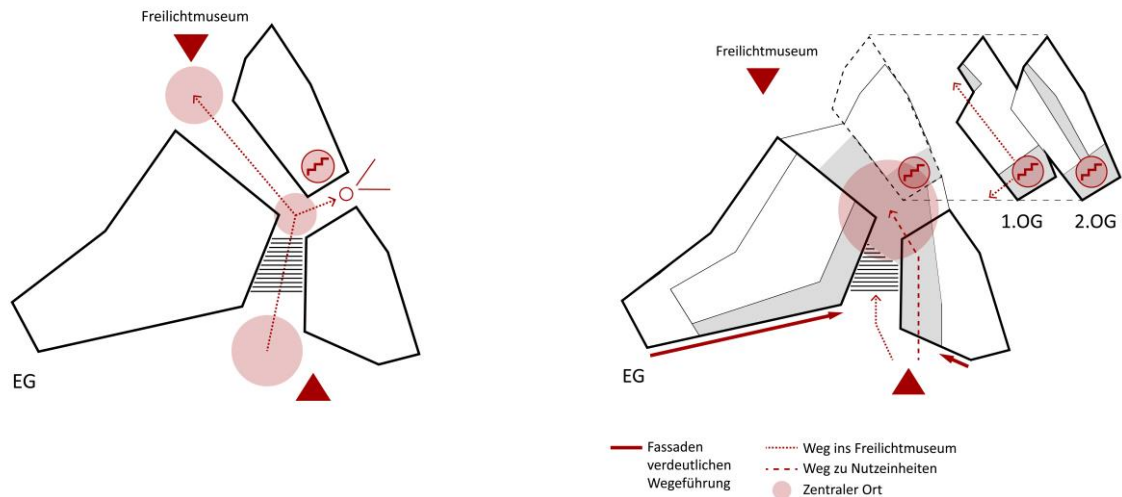


Abbildung 30: Optimierte Wegeführung intern (links) und extern (rechts)

#### 7.1.4 Erschließung und Adressbildung

Die abgeschrägten Gebäudekanten der Erschließungsseite des Ausstellungs- und Eingangsgebäudes formen eine einladende Geste und leiten den Besucher zum Haupteingang und der großzügigen Freitreppe, die zwischen den polygonalen Körpern verläuft und den Besucher vom Vorplatz über die Halle des Foyers zum Ausstellungsgelände führt. Dabei passiert der Besucher verschiedene Plätze, von denen sich gezielte Blickachsen in die Landschaft und auf historische Gebäude eröffnen. Zudem ermöglicht die Aufteilung in drei Baukörper eine klare interne Wegeführung sowie eine schnelle Orientierung durch das Gebäude-Ensemble. Dazu bildet das Foyer im Erdgeschoss das Zentrum des Gebäudekomplexes und dient der innenliegenden vertikalen und horizontalen Erschließung der verschiedenen Funktionsbereiche.

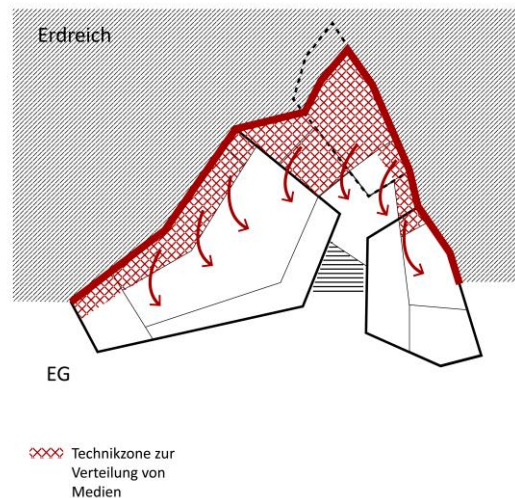


Abbildung 31: Technikzone



### 7.1.5 Technik

Durch das ins Erdreich geschobene Erdgeschoss wird auf der Rückseite des Gebäudes eine unbelichtete und gebäudeübergreifende Technik- und Nebenraumzone ausgebildet. Die Zone bildet das Rückgrat des Gebäudekomplexes und ermöglicht die Verteilung von Medien und Technik durch das gesamte Gebäude, ohne dabei Einfluss auf die Gestaltung der repräsentativen Räume zu nehmen.

## 7.2 Ökobilanzierung

Im folgenden Kapitel wird eine Hochrechnung zur Ökobilanz basierend auf den zuvor dargestellten Materialien (vgl. Kap. 4) und Baukonstruktionen (vgl. Kap 5) vorgenommen. Es wird jeweils die ökologisch beste Lösung mit einer aus Sicht der Bearbeiter „konventionellen“ Lösung verglichen. Die Betrachtung erfolgt auf der Grundlage der von den Architekten ermittelten Baumassen und Volumen und bezieht mit den dargestellten Bauteilen und zum Planungsstand natürlich noch nicht alle Baukonstruktionen und Funktionsschichten mit ein. Bilanziert werden: die Außenwände (tragend und nichttragend), die Glasfassade mit einer Aluminiumkonstruktion, Innenwände (tragend und nichttragend), Dachkonstruktionen (Holz und Stahlbeton) sowie die Deckenkonstruktionen (Holz und Stahlbeton).

In der Bilanz dieser verglichenen Bauteile zeigt sich ein deutliches Teilergebnis. Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf kann durch die vorgeschlagene Bauweise um mehr als 90% reduziert werden. Der Anteil der aufgebrachten erneuerbaren Energie steigt dagegen deutlich an, dies liegt an der Masse biogener Baustoffe wie Holz und Dämmstoffen. Alleine in der Holzdachkonstruktion verzehnfacht sich dieser Wert zwischen einer Standard Stahlbetondecke und dem gewählten Fachwerkträger mit Strohdämmung (vgl. Anhang 6.4). Bei dem hier in besonderer Weise fokussierten CO<sub>2</sub> Wert werden somit die Vorteile der gewählten Konstruktionen sichtbar: der Wert des konventionellen Baus konnte bis in den negativen Bereich reduziert werden. Das heißt dass hier CO<sub>2</sub> für die nächsten Jahre gebunden wird, statt es zu emittieren...

Die Werte werden sich natürlich noch verändern, je mehr Werte einbezogen werden und je mehr finale Entscheidungen zu einzelnen Konstruktionen getroffen werden. Insbesondere die Haustechnik, die in einem Museum i.d.R. umfangreicher ist als in einem normalen Haus, wird den Herstellungsaufwand des Gebäudes noch einmal verändern. Je stärker jedoch auch die kommenden Planungsphasen von Betrachtungen zur Ökobilanz geprägt sein werden, desto weniger könnte das Gebäude emittieren, möglicherweise sogar, so wie hier angegeben, ein Speicher für CO<sub>2</sub> und erneuerbare Energien sein.

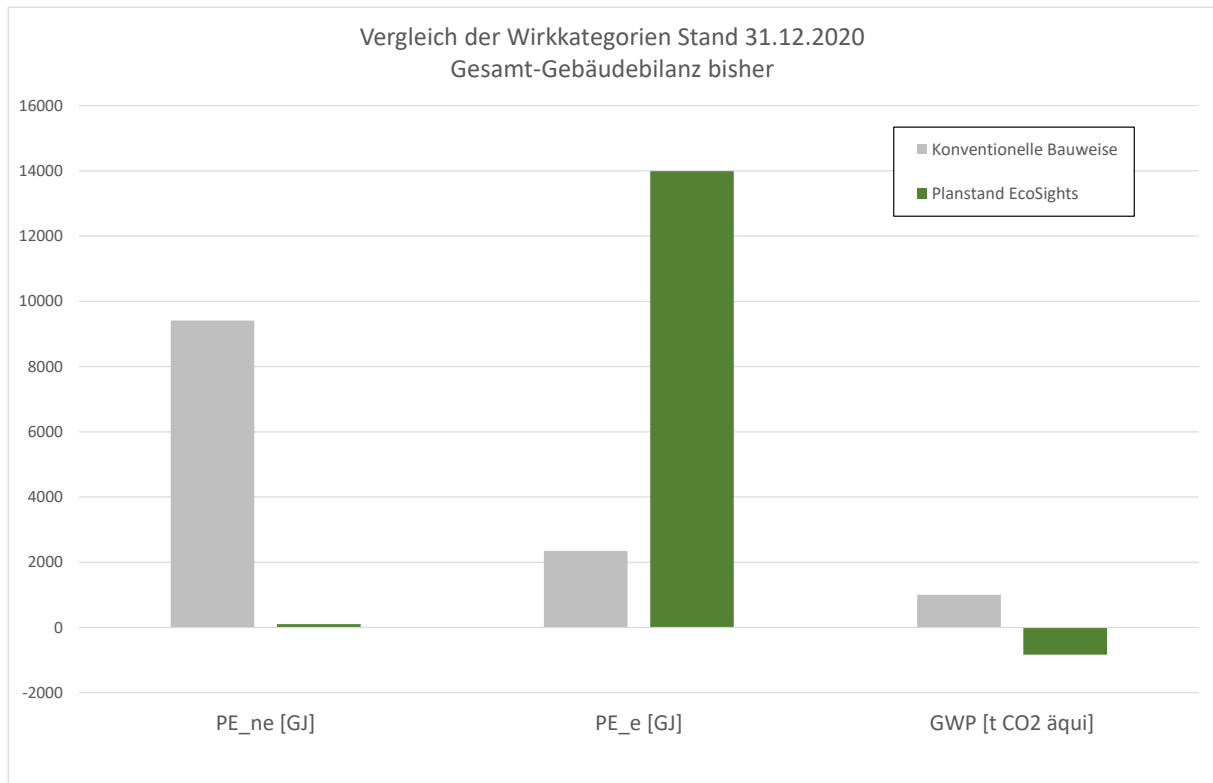


Abbildung 32 Erste Hochrechnung einer Ökobilanz für das neue Empfangsgebäude- Vergleich ökologischer Konstruktionen mit einer „konventionellen“ Bauweise

### 7.3 Bauklimatik

#### 7.3.1 Zonierung des Ausstellungsbereichs

Der Ausstellungsbereich soll ein Ort großer Klimakonstanz sein, welche mit möglichst geringem energetischen Zusatzaufwand hergestellt werden soll. Der Raum und das dort herrschende Raumklima dienen dem Schutz der dortigen Ausstellungsstücke. Der gesellschaftliche Auftrag eines Museums ist es aber auch, Menschen an den dort aufbewahrten Kulturgütern teilhaben zu lassen, zumindest visuell. Damit verbunden ist die willkommen heißende Geste, die ein Museumsgebäude innehaben sollte. Besucher wünschen sich Transparenz und Licht und möglichst direkten Zugang.

Innerhalb einer Parameterstudie wurden die raumklimatischen Auswirkungen einer großflächigen Glasfassade (ca. 250 m<sup>2</sup>; U=0,8 W/m<sup>2</sup>K, g =0,4) als Raumabschluss der Ausstellung im Vergleich zu einem Ausstellungsraum aus gänzlich opaken Umschließungsbauteilen mit vorgeschalteter Pufferzone durch Einzug einer massiven Trennwand aus 60cm Stampflehm (siehe Kapitel 5.1) beleuchtet.

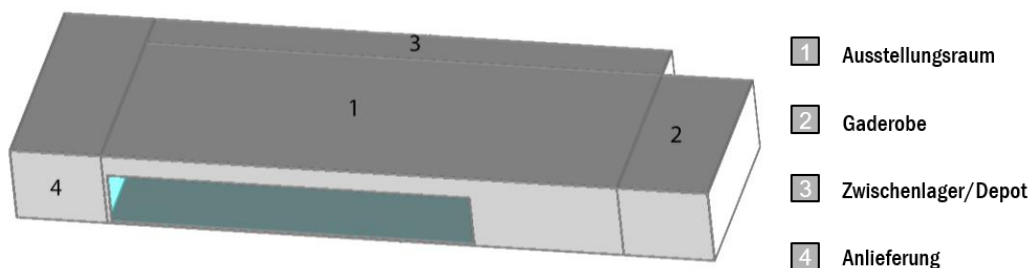


Abbildung 33: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus ohne Vorzone

Als interne Lasten werden durchgängig 20 Personen mit personenbezogenem Außenluftvolumenstrom von 400 m<sup>3</sup>/h während der Öffnungszeiten modelliert. Die Untersuchung erfolgte unter Verwendung des Testreferenzjahres Kassel - Extremer Sommer.

Die Jahresverläufe machen deutlich, dass die Abspaltung einer puffernden Vorzone, dem sog. Open Space, in erheblichem Maße zur Reduzierung deutlich überhöhter Innentemperaturen im eigentlichen Ausstellungsbereich beiträgt. Im Ausstellungsbereich ohne vorgeschaltete Pufferzone liegen die sommerlichen Höchsttemperaturen mit bis zu 29°C um bis zu 5K höher als mit Open Space. Hier liegen Maximalwerte bei gut 24°C. Zudem schwanken die Temperaturen ohne Vorzone dann über den Tag um ca. 2K, mit Vorzone sind die Schwankungen kaum nennenswert.

Dies ist damit zu erklären, dass bei Abspaltung der Vorzone die solaren Lasten den hochwertigen Ausstellungsbereich nur untergeordnet tangieren. Außerdem wirkt die eingebrachte Stampflehmwand aufgrund ihrer Massivität zusätzlich in thermischer und hygrischer Hinsicht stabilisierend auf das Raumklima ein.

Bei gleichhohen Feuchtelasten in beiden Varianten und reduziertem Luftwechsel bewirken die hohen Lufttemperaturen im nicht unterteilten Ausstellungsraum vergleichsweise niedrige relative Raumluftfeuchten im Sommer.

### **7.3.2 Zonierung und Lage**

Für die Entwurfs- und Ausführungsplanung von Depots, Archiven und Museen ähnlicher Größe lassen sich unter bauklimatischen Gesichtspunkten die folgenden (theoretischen) Empfehlungen festhalten, die abschließend simulatorisch überprüft werden sollen.

Um einer großen Temperaturschwankung entgegenzuwirken, sollte das Gebäude idealerweise, sofern es die örtliche Topografie zulässt, mit mindestens drei Gebäudeseiten in einer Mindesthöhe von 2 bis 3m im Erdreich stehen. Ein insgesamt im Erdreich abgesenkter Gebäudekörper würde zwangsläufig eine stufenlose Erschließung der Innenräume unmöglich machen, wäre aber bzgl. der Klimakonstanz ideal. Diese Ausführung kommt demnach insbesondere für nicht öffentlich zugängliche Lagerräume in Betracht.

Weiterhin sollte die Südausrichtung von Öffnungen vermieden werden, um ausgeprägte, kurzfristige Temperaturschwankungen zu vermeiden. Wenn sich Südfenster aufgrund der örtlichen Situation nicht vermeiden lassen, sollte eine Pufferzone mit möglichst großem Raumvolumen an der Außenseite angeordnet und durch massive Bauteile mit einer hohen thermischen Speichermasse von dahinterliegenden Ausstellungsbereichen abgetrennt werden. Diese können dabei beispielsweise als großzügige Eingangsbereiche dienen, in denen Temperaturschwankungen bis zu einem gewissen Maß unproblematisch sind. Kleine Pufferzonen sind hingegen unvorteilhaft, weil die einfallenden Wärmeenergie hier zu erheblichen Temperaturspitzen führen können. Im Hinblick auf großzügige Fensterflächen wird stattdessen eine Nordorientierung empfohlen. Die aus dieser Richtung einfallende, diffuse Sonnenstrahlung hat dabei im Innenraum nur eine mäßige Temperaturschwankung zur Folge.

In Bezug auf die Bodenplatte wird unter Berücksichtigung der dargelegten Energiebilanzierung eine unterseitige, mehrere Meter breite, horizontale Randdämmung empfohlen. Eine vertikal ausgeführte Randdämmung mit einer Mindesthöhe von 2m kann ebenfalls in Erwägung gezogen werden, wenn ohnehin tiefgreifende Fundamente erforderlich sind. Andernfalls hätte eine solche Ausführung einen unverhältnismäßigen Mehraufwand zur Folge. Weiterhin sollten erdberührte Außenwände außenseitig mit einer 3 m in das Erdreich einbindenden Dämmung versehen werden. Die verbleibende Oberfläche der erdberührten Bodenplatte sowie der erdberührten Außenwände sind ungedämmt

auszuführen und ermöglichen somit einen natürlichen Wärmeaustausch zwischen Innenraum und Erdreich, welcher einen nennenswerten passiven Beitrag zur Klimatisierung im Winter sowie im Sommer darstellt.

### 7.3.3 Kombinationsbetrachtung

Das nun betrachtete Gebäude mit 30m Breite, 60m Länge und knapp 10m Höhe soll auf einem frei erfundenen Grundstück neu entworfen und entsprechend der nachfolgenden Beschreibung definiert werden. Weil die thermische Stabilität im Innenraum von einer hohen erdberührten Außenoberfläche abhängig ist, soll das Gebäude in Längsrichtung in einer Tiefe von 7,2m in den Hang platziert werden. Dabei soll eine kurze Gebäudefront mit Nordausrichtung bündig mit dem beschriebenen Geländeversatz abschließen. Weiterhin soll sie auf der gesamten Länge eine raumhohe Glasfassade mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  erhalten.

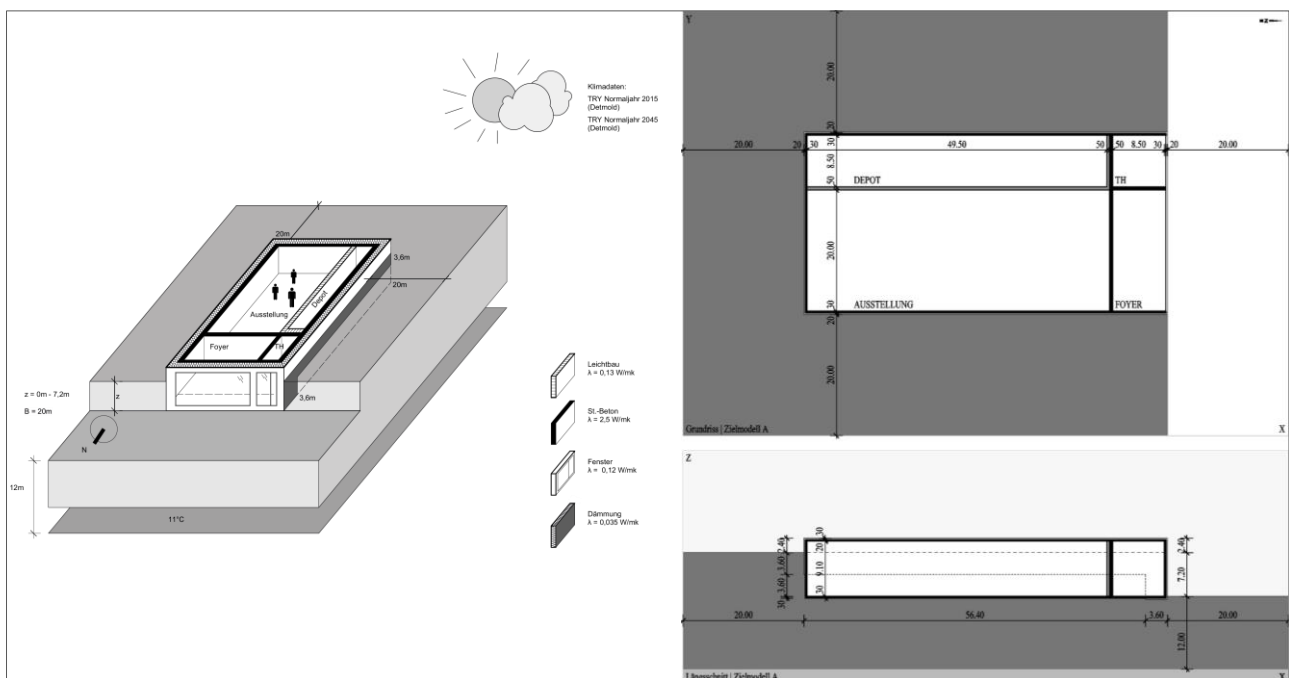


Abbildung 34: Zielmodell, Grundriss- und Schnittzeichnung - Depot, Treppenhaus, Foyer, Ausstellung

Im Rahmen dieser Annahme kann die Erschließung nur über die beschriebene Nordseite erfolgen. Für den Innenbereich werden vier Raumzonen definiert, die durch ein Foyer mit seitlich angeordnetem, abgeschlossenen Treppenraum, durch einen dahinter befindlichen Ausstellungsraum sowie durch ein an den Ausstellungsraum grenzendes Depot gebildet werden.

Durch Annahme eines unverändert 9,6m hohen Ausstellungsgebäudes, welches auf einer Höhe 7,2m an Ost-, Süd- und Westwänden erdberührt ist, soll eine thermische Stabilität insbesondere in den Depot- und Ausstellungsräumen erreicht werden. Sämtliche erdberührte Außenwände sind mit 3,6m tief in das umliegende Erdreich einbindende Wärmedämmung versehen. Der seitliche und untere Randbereich der Nordfassade (d.h. in Ost- und Westorientierung sowie Bodenplatte) sind ebenfalls mittels einer 3,60m breiten vertikalen bzw. horizontalen Randdämmung gedämmt. Die übrige erdberührte Bauteiloberfläche der Bodenplatte verbleibt wie die unteren Bereiche der erdberührten Außenwände ungedämmt.

Außenwände und Dach bilden eine wärmeschutztechnisch hochwertige Hülle gegen Außenluft ( $U = 0,17$  bzw.  $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Im Innenraum grenzt eine 50 cm starke Betonwand den Eingangsbereich von den dahinterliegenden Depot- und Ausstellungsraum ab. Der Depotbereich erhält zusätzlich eine Holzwand (50 cm Vollholz,  $\lambda = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Alle Simulationen am Kombinationsmodell erfolgen unter Berücksichtigung des TRY Normaljahr 2015 sowie des TRY Normaljahr 2045 bei Annahme einer sich frei einstellenden Innentemperatur sowie eines der DIN 4108-2 entsprechenden internen Wärmeeintrags von 144 Wh/(m²d). Sie ergeben bei klimatischen Bedingungen gemäß TRY Normaljahr 2045 wärmere Temperaturen im Innenraum. Die Temperaturen im Depot verhalten sich aufgrund seiner Wärmedämmung und „Abschottung“ unabhängig vom gewählten Klimadatensatz, die sich frei einstellende Innentemperatur bewegt sich zwischen 12,2°C Ende Februar und 16,3°C Ende August.

Die Innentemperatur im Ausstellungsraum bewegen sich im Jahresverlauf unter den Klimabedingungen sowohl des TRY 2015 als auch des TRY 2045 innerhalb einer Spanne von rund 6K. Für das TRY 2015 ergeben sich Temperaturen zwischen 14,9°C und 20,1°C. Für Treppenhaus und Foyer, ergeben sich im Jahresverlauf zwischen Temperaturwerte zwischen 10,5°C und 25,5°C.

Insgesamt lässt sich anhand der Innenraumtemperaturen erkennen, dass die Berücksichtigung sehr günstiger bauklimatischer Randbedingungen die gewünschten Ergebnisse bzgl. Klimakonstanz und Temperaturniveau und damit auch Heiz- und Kühlenergiebedarf bringen. So können die an der Nordfassade gelegenen Räume die im Außenraum auftretenden Temperaturen abpuffern, sodass in den dahinterliegenden Räumen deutlich geringere Temperaturschwankungen resultieren. Dabei spielen auch die massiven Innenwände, welche über den Tag gespeicherte Wärmeerträge bei Nacht wieder an den Raum abgeben, eine entscheidende Rolle. Gleichzeitig sind den Leichtbauwänden aus Holz die hohe thermische Stabilität im Depot zu verdanken, die für die langfristige Lagerung von Ausstellungsgütern unerlässlich ist.

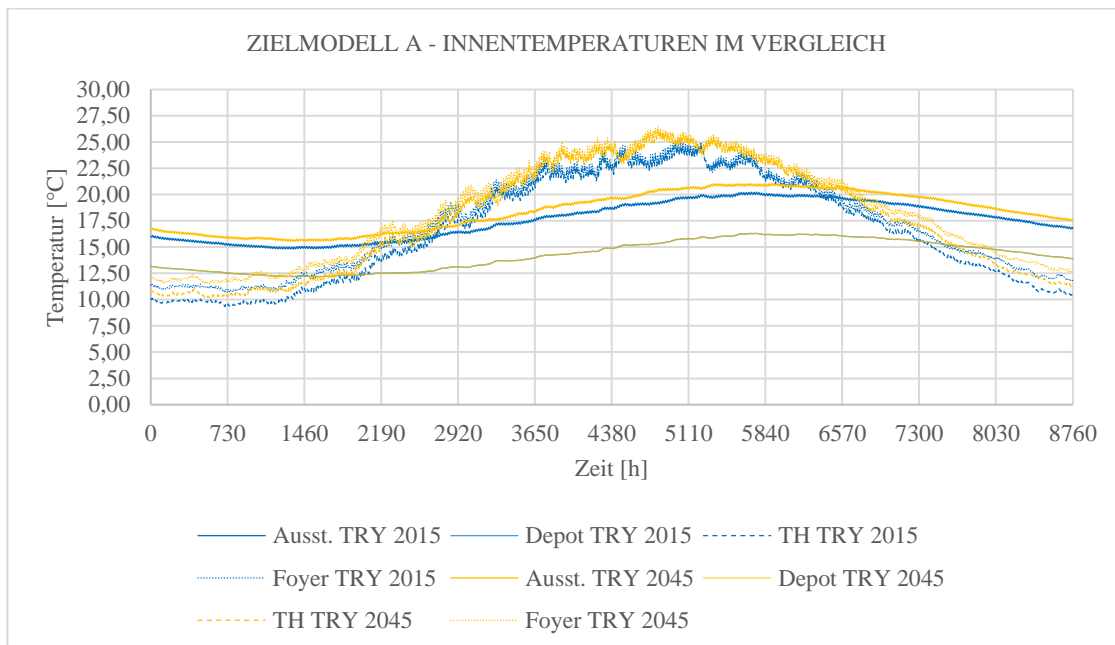


Abbildung 35 Zielmodell A: sich frei einstellende Innentemperaturen im Vergleich

Als Quintessenz lässt sich allgemein zusammenfassen, dass mit dem folgenden Maßnahmenbündel

- hohes Maß an Kompaktheit
- hohes Maß an Erdkontakt mit lediglich im Randbereich gedämmten erdberührten Bauteilen,
- hohes wärmeschutztechnisches Niveau der Gebäudehülle gegen Außenluft,
- nordorientierte Verglasungsflächen,
- Innenbauteile in sehr schwerer Bauweise,
- Vorschalten einer voluminösen Pufferzone

ein Museumsbetrieb im normalen Modus (keine nennenswerten Besucherspitzenzeiten) ohne jegliche Art von Beheizung oder Kühlung und bei Lüftung mit unconditionierter Außenluft möglich ist, die Klimabedingungen nach ASHRAE A1 mit den dort definierten Kurz- und Langzeitschwankungen bezüglich der sich gänzlich frei einstellenden Innentemperaturen zu erfüllen. Um Spitzenzeiten und zukünftigen Hitzeperioden sicher angesichts des konservatorischen Anspruchs begegnen zu können, erscheint eine Klimatisierung dennoch angezeigt. Durch Umsetzen der bauklimatischen Grundempfehlungen kann diese dann deutlich kleiner dimensioniert werden.

Dass sich diese unter rein bauklimatischen Gesichtspunkten identifizierten Idealbedingungen aufgrund vielfältiger örtlicher Zwangspunkte wohl nur selten in genau dieser Form realisieren lassen, ist allerdings ebenfalls ersichtlich.

## 8 Energiesystem (incl. Monitoring) und Betrieb

### 8.1 Energieflussmodell

Die Anforderungen für den Betrieb eines Energiemanagementsystems (EMS) sind in erster Linie der Zugang zu Energiebedarfen und Nutzungsinformationen. Der erste Schritt zur Entwicklung und Abschätzung der Wirkung eines EMS ist die Erstellung eines Energieflussmodells. Grundlegend sind dazu Sollbereiche für energetische Zielgrößen und deren Zugehörigkeit zu definieren. Die wichtigste Festlegung ist der Betriebskorridor, bei dem das Museumsgebäude in der Lage sein muss, bei vorgegebenen Außentemperaturen und Luftfeuchten die konservatorischen Klimabedingungen einzuhalten. Eine Maximalauslegung erscheint vor dem Hintergrund des nachhaltigen Museums nicht unbedingt nötig. Unter Umständen könnte die Ausstellung bei extremen Wetterbedingungen zeitweise (einige Tage/ Jahr) geschlossen werden. Eine entsprechende Orientierung über die Wetterdaten erhält man, wenn historische Wetterdaten (Temperatur und Feuchte) in einem zweidimensionalen Histogramm aufgetragen werden (Abbildung 36). Dazu wurden Wetterdaten von 17 Jahren ausgewertet.

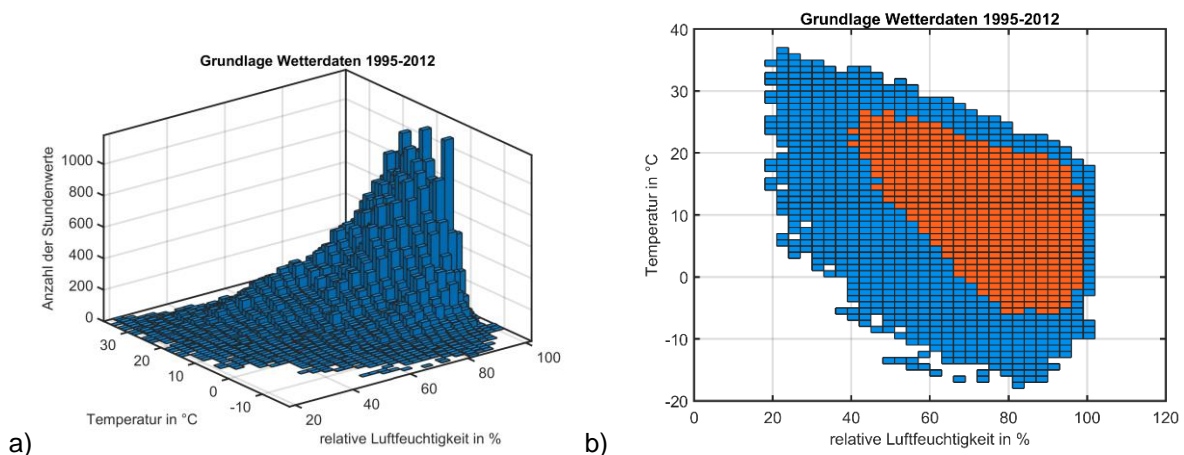


Abbildung 36: a) Anzahl der Stunden bei bestimmten Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten. b) In Rot die Werte, die 90% aller Stunden beinhalten, in Blau die Werte die nur 10% aller Stunden beinhalten.

Zur besseren Orientierung wurden (Abbildung 36) die Werte markiert, deren Gesamtheit 90% der Stunden ausmachen, zusätzlich ist die Grafik in Draufsicht dargestellt. Die Datengrundlage bilden die Jahre 1995-2012, welche im Ressortforschungsprojektes „TRY-Weiterentwicklung“ meteorologisch erfasst wurden.

### 8.1.1 Energieflussmodell

Das Energieflusskonzept des Museums basiert auf einer Betrachtung der Hauptenergieflüsse ins und aus dem Museumsgebäude. Im Rahmen der Energieflussbetrachtung werden alle Komponenten auf Basis eines 15min – Rasters modelliert. In diesem Projektstadium ist dies immer mit groben Annahmen verbunden. Im Laufe des Entstehungsprozesses und während des Betriebes werden diese jedoch genauer definiert und gemessen. Trotzdem ist die frühe Modellierung durchaus sinnvoll, da die Modelle bis in die Implementierung des Energiemanagementsystems nutzbar sind und im Laufe der Verfeinerung der Modelle immer bessere Zielgrößen definiert werden können. Als Basis für das Energieflussmodell wurde das Jahr 2017 gewählt, sodass der Großteil der Prognosen auf den Wetter- und Netzdaten aus diesem Jahr basiert. Der Wechsel des Basisjahres ist jederzeit möglich, solange die entsprechenden Daten zugänglich sind. Aufgrund der außergewöhnlichen Wetterlage in den Jahren 2018 (sehr trocken, sehr sonnig) und 2019 (ertragreiches PV Jahr) wurde 2017 als Referenz gewählt, um die PV Erzeugung nicht massiv über zu bewerten.

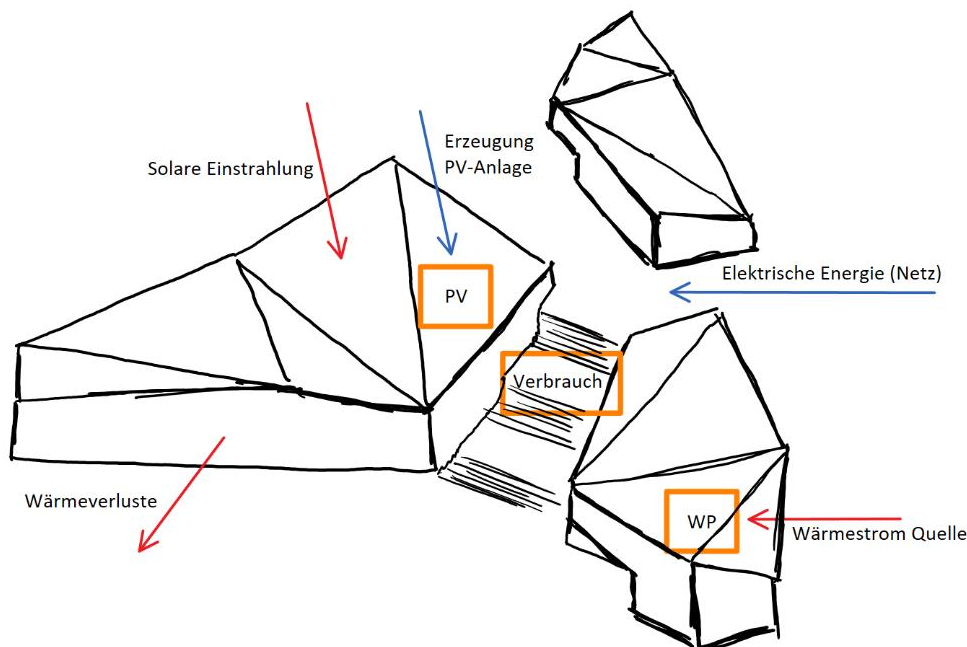


Abbildung 37: Schematische Darstellung des Museumsgebäudes mit elektrischen Energieflüssen in Blau, thermischen Energieflüssen in Rot und internen Prozessen in Orange.

### 8.2 Thermische Energieflüsse

Die Wärmepumpenanlage (WP) mit 200kW thermischer Leistung (ca. 40-50kW elektrische Leistungsaufnahme) ist der größte steuerbare Einzelverbraucher im geplanten Museumsgebäude. Die WP Anlage stellt im Winter Wärme und im Sommer Kälte bereit. Da einige thermische und elektrische Energieflüsse koppeln (z.B.: bei der Wärmepumpe) ist die Reihenfolge nicht linear darstellbar. Hier wird mit den thermischen Energieflüssen gestartet. Grundlage der meisten thermischen Energieflüsse ist die Außentemperatur, für das Referenzjahr wurden die Temperaturen vom Deutschen Wetterdienst bezogen (Abbildung 37).

Der thermische Energiefluss aus und in das Gebäude basiert auf dem Temperaturunterschied zwischen Innen und Außen, sowie den bauphysikalischen Gebäudeeigenschaften. Insgesamt können in einem einfachen Modell die thermische Heizleistung und die thermische Kühlleistung durch Lastkurven beschrieben werden. In diese Kurven gehen die Normheizlast, die Normkühllast und die Heiz- und die Kühlgrenzen ein. Da die echten Gebäudeeigenschaften noch nicht vollständig bekannt sind, wurden an dieser Stelle folgende Annahmen getroffen:

Tabelle 1: Temperaturen für das Referenzjahr vom Deutschen Wetterdienst

Normheizlast	160 kW
Normkühllast	120 kW
Normkühltemperatur	40°C
Normheiztemperatur	-12°C
Heizgrenze	14°C
Kühlgrenze	22°C
Innentemperatur	20°C

Damit ergibt sich der temperaturabhängige thermische Energiebedarf. In der Abbildung 38 sind die benötigten thermischen Leistungen für die Heizung und die Kühlung enthalten. Zusätzlich ist die jährliche Verteilung der Tagesmitteltemperaturen dargestellt, um die Heiz- und Kühldauern/-phasen besser zu erkennen.

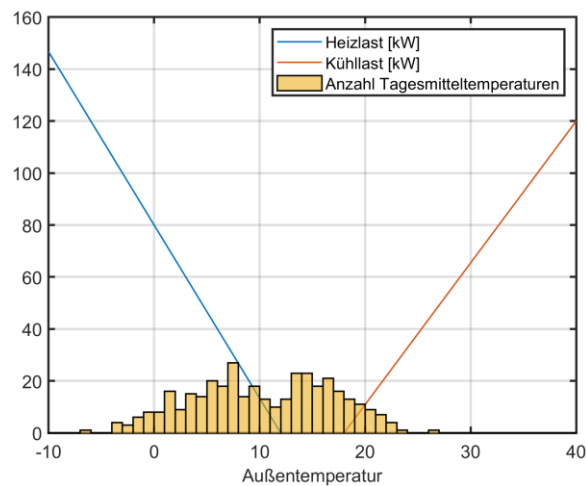


Abbildung 38: Kennlinien der Heiz- und Kühlleistung und die Verteilung der Tagesmitteltemperaturen.

Zusammen mit den Außentemperaturen können aus diesen Kennlinien sowohl für die Heizung als auch für die Kühlung die thermischen Leistungen zu jedem Zeitpunkt im Referenzjahr berechnet werden. Dabei wird zwischen der rechnerischen Momentanleistung und der Leistung, die durch die Pufferwirkung des Gebäudes etwas gleichmäßiger verläuft, unterschieden. Im Rahmen eines einfachen Energieflussmodells wird dieser Verlauf durch einen Moving Average Filter mit einem Filterfenster von 8h erzeugt. Deutlich sichtbar (Abbildung 39) sind die Heizleistungen im Winter und die Kühlleistungen in den Sommermonaten. Zu besserer Übersichtlichkeit ist ein zeitlich beschränkter Ausschnitt gesondert dargestellt.



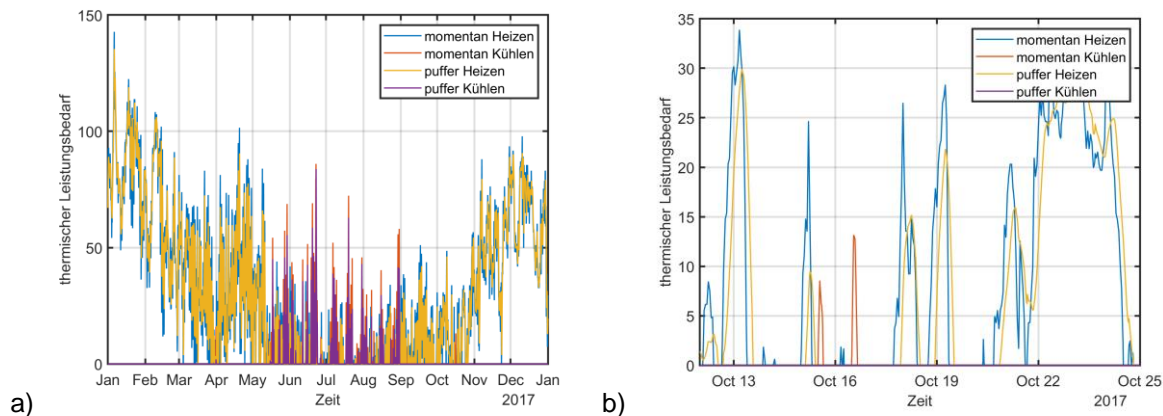


Abbildung 39: Thermischer Leistungsbedarf für das Heizen und Kühlen mit und ohne die Pufferwirkung des Gebäudes a) (Ausschnittsweise für einige Tage im Oktober b)).

Um aus den thermischen Leistungen zu den elektrischen Leistungen zu wechseln, muss der Wirkungsgrad (der sogenannte COP) der Wärmepumpen bekannt sein. Dieser ändert sich allerdings je nach Außentemperatur, da diese die Vorlauftemperatur der Heizkreise beeinflusst. Zusätzlich ist beim Kühlbetrieb eine inverse Nutzung der Wärmepumpe zu beachten, denn in diesem Fall wird die Quellenseite die kalte Nutzenergieseite, während die Senkenseite Abwärme abgibt. Somit sind bei bekannten Heiz- und Kühlkurven und der Außentemperatur die groben Kondensations- und Verdampfungstemperaturen der Wärmepumpe bestimmt und damit der COP aus einem Wärmepumpenkennfeld berechenbar. Auf diese Weise ist die genutzte thermische Energie (inkl. der Pufferwirkung des Gebäudes) umrechenbar in einen elektrischen Bedarf der Wärmepumpe für den Heiz- und Kühlbetrieb (Abbildung 40).

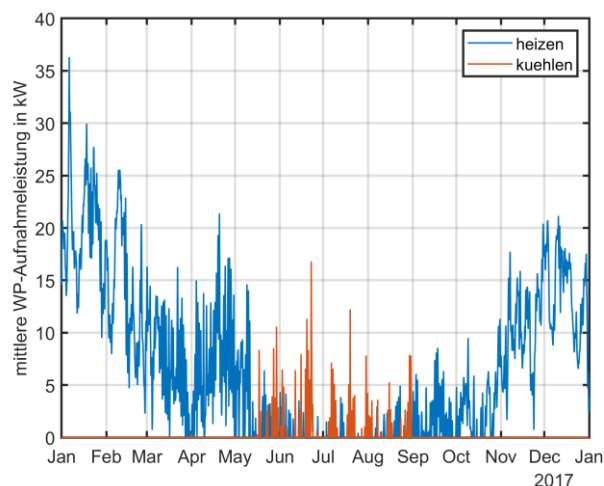


Abbildung 40: Aufnahmeleistungen der WP zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfes.

Auf diese Weise sind aus den thermischen Leistungsbedarfen elektrische Leistungsaufnahmen berechnet worden. Diese werden im Folgenden in den elektrischen Energieflüssen weiter betrachtet und verarbeitet.

### 8.2.1 Elektrische Energieflüsse

Die lokale elektrische Energieerzeugung basiert auf Photovoltaik. Die elektrische Leistung der PV-Anlage wird berechnet durch die direkte und die diffuse Einstrahlung auf die Module. Dazu wird aus den Standortdaten der Sonnenverlauf berechnet und der Strahlungsleistungsfluss bestimmt. Aus

den historischen Wetterdaten (Bewölkungsgrad) wird der Strahlungsleistungsfluss korrigiert und so zusammen mit dem Außentemperaturabhängigen Wirkungsgrad die Leistung der PV-Anlage modelliert. Als mögliche Eingaben für das Modell dienen die Peakleistungen und die Ausrichtungen (Azimut und Deklination) der PV-Anlagen. Durch eine einfache geometrische Analyse der Dachflächen und der Annahme von 330W Modulen ergibt sich eine Peakleistung von ungefähr 495kWp. Damit lässt sich im Idealfall (blau) ohne Bewölkung und mit Bewölkung (rot) die in Abbildung 41 elektrische Leistung erzeugen.

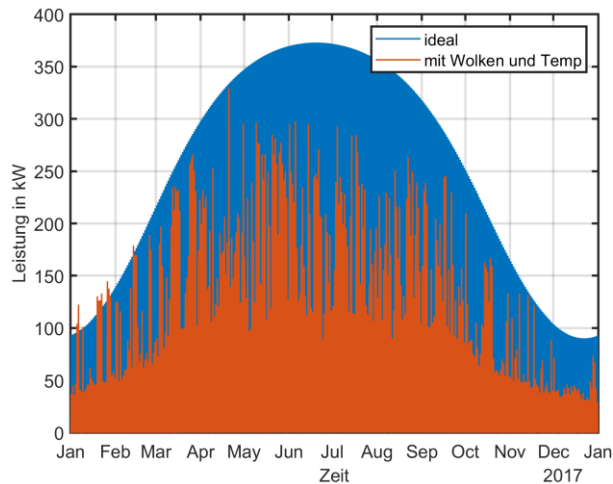


Abbildung 41: Durch PV erzeugte Leistung in Blau ideal modelliert und in Rot mit Integration von Wolken und Betriebstemperaturen.

Die Verbrauchsdaten werden anhand eines vorhandenen Lastprofils modelliert. Die Basis des Lastprofils sind Messungen der Liegenschaft des LWL Detmold aus dem Jahr 2019, diese wurden für das Jahr 2017 übernommen. In diesem Profil sind allerdings alle elektrischen Verbraucher der gesamten Liegenschaft enthalten und spiegeln damit nicht unbedingt den Verbrauch eines Ausstellungsgebäudes wieder. Dieses Profil bildet qualitativ den Lastgang ab, in der absoluten Höhe ist es aber deutlich zu hoch. Aus diesem Grund wurde das Lastprofil so normiert, dass eine Grundlast von 10kW für das Gebäude angenommen wird. Das finale Lastprofil ist in Abbildung 42 dargestellt.

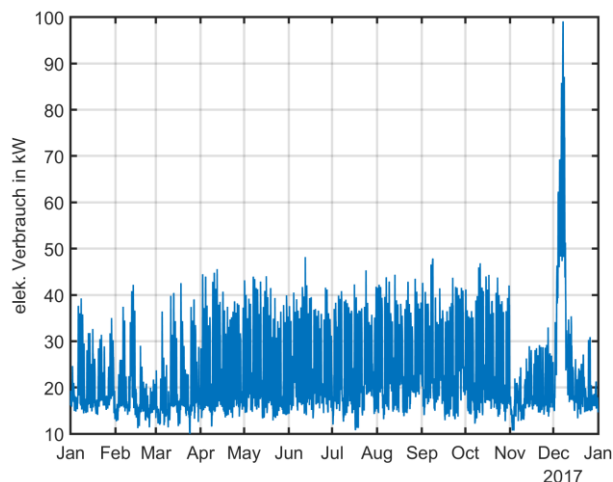


Abbildung 42: Auf 10kW Grundlast normiertes Lastprofil der Liegenschaft LWL Museum Detmold

Die Gesamtbilanz der elektrischen Leistung ergibt sich nun aus der einfachen Summe aller elektrischen Einzelverbraucher und Erzeuger. Dabei wird allerdings differenziert zwischen nicht verschiebbarer Erzeugung, Verbrauch und verschiebbarem Verbrauch. Anhand der gegebenen

Randbedingungen wird davon ausgegangen, dass die WP-Anlage grundsätzlich ein verschiebbarer Verbraucher ist. Im Folgenden werden nun die Emissionen für den thermischen Heizbedarf für drei Szenarien berechnet.

1. Thermischer Heizbedarf gedeckt durch Gastherme
2. Thermischer Heizbedarf gedeckt durch Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage
3. Thermischer Heizbedarf gedeckt durch Sole-Wasser-Wärmepumpenanlage mit angenommen optimalen Energiemanagementsystem.

Für diesen Vergleich wird o.B.d.A. bewusst nur der Heizbedarf betrachtet, da die Gastherme keine Kühlfunktion bereitstellen kann. Wird hier der Kühlbedarf mit einbezogen, werden die Emissionswerte zugunsten der Gastherme verzerrt. Die Berechnung der Emissionen für die Gastherme basiert auf der kumulierten Heizenergie von ca. 265 MWh für das gesamte Referenzjahr und dem Emissionsfaktor von Erdgas von 299gr/kWh Heizenergie. Es ergibt sich eine gesamt CO<sub>2</sub> Emission von ca. 79 Tonnen. Die Berechnung der Emissionen für die Wärmepumpenanlage ohne Energiemanagementsystem ergibt sich aus der Annahme, dass die Wärmepumpenregelung die Energie im Mittel gleichmäßig über den Tag verteilt nutzt. Diese Annahme ist fehlerbehaftet, denn die Wärmepumpen werden eher dann laufen, wenn der Bedarf hoch ist. Allerdings werden durch die internen Speicher und die Regelungseinstellungen diese Zeitenkorridore stark verbreitert. Insgesamt sind die echten Laufzeiten schwer festzulegen. Um hier keine künstliche Benachteiligung zu schaffen, verbraucht die Wärmepumpenanlage die elektrische Energie die notwendig ist, um den thermischen Tagesbedarf zu decken, allerdings mit den mittleren CO<sub>2</sub> Tagesemissionen des Strommixes (die Berechnung der CO<sub>2</sub> Emissionen aus dem Strommix ist im Anhang dargestellt), in den die PV Anlage inkludiert ist. Für die Wärmepumpenanlage ergibt sich eine gesamt CO<sub>2</sub> Emission von ca. 23 Tonnen.

Die Berechnung der Emissionen für ein optimales Energiemanagement basiert darauf, dass durch vorhandene Speichermassen der gesamte Heizeinsatz gezielt innerhalb eines Tages verschoben werden kann. Dann ist ein optimales Energiemanagementsystem in der Lage die Zeiten zu nutzen, in denen die CO<sub>2</sub> Emissionen für diesen Tag am Niedrigsten sind. Auch hier muss die WP-Anlage die Menge an elektrischer Energie beziehen, die notwendig ist, um den thermischen Tagesbedarf zu decken. Wenn aber dazu grundsätzlich die emissionsärmsten Stunden des Tages genutzt werden, ergibt sich eine geringe Gesamtemission von ca. 15 Tonnen CO<sub>2</sub>. Der Unterschied zwischen normalen und optimierten Betrieb sind in Abbildung 43 dargestellt. Dabei wird sichtbar, dass das EMS besonders in den Übergangszeiten die Emissionen deutlich senken kann.

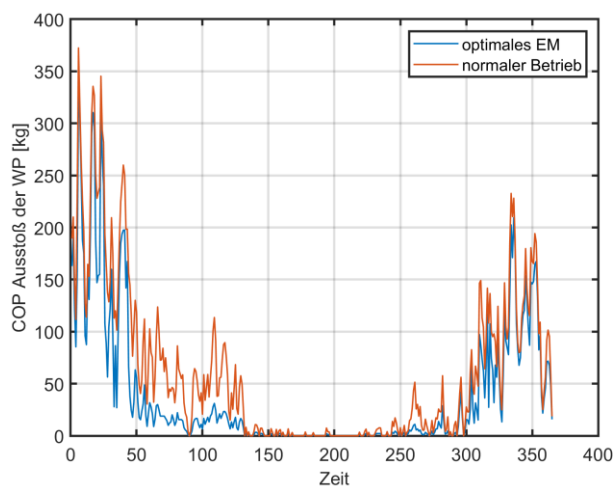


Abbildung 43: Täglicher CO<sub>2</sub> Ausstoß der WP für den normalen WP-Betrieb (rot) und den Betrieb mit optimalem EM (blau)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein optimales EMS für den Heizbedarf die Emissionen um bis zu 33% senkt. Ähnliche Potenziale sind auch bei anderen steuerbaren Verbrauchern zu erwarten. Der Gesamtvergleich mit dem Gas zeigt, dass durch den fossilen Energieträger bei Weitem die größten Emissionen entstehen. Zusätzlich gibt es beim Gas mittelfristig keine weiteren Verbesserungen, während der Anteil der erneuerbaren Energien in den nächsten Jahren weiter steigen wird und damit auch im Betrieb die Emissionen im Laufe der Zeit abnehmen werden. Durch ein Energiemanagement, das mehrheitlich erneuerbar erzeugte Energie nutzt, wirkt das Museum sogar netzdienlich.

### 8.2.2 Netzdienlichkeit

Ein weiterer wichtiger Schritt zusätzlich zu eigenen erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen ist die Sektorenkopplung, durch die es möglich ist, netzdienlich zu sein und den Ausbau der erneuerbaren Energien direkt mit zu vereinfachen. Dies ist für höhere Integrationsgrade unerlässlich, da durch Sektorenkopplung Energiespeicher nutzbar gemacht werden. An dieser Stelle wird das Kopplungskonzept dargestellt und beschrieben, auf welche Weise die zeitaufgelösten Messwerte verwendet werden können, um das Potenzial der Sektorenkopplung aufzuzeigen.

Im klassischen Energieflusskonzept gibt es keine Datenverbindung zwischen Endgerät und dem Stromnetz (Abbildung 44, schwarze Komponenten). Dadurch verbrauchen die Endgeräte völlig unabhängig von der erneuerbaren Energieerzeugung elektrische Leistung. Der genaue zeitliche Verbrauch ist dabei relativ individuell und hängt sehr stark vom jeweiligen Nutzer ab. In einigen Fällen ist allerdings eine Korrelation festzustellen, die durch physikalische Gesetzmäßigkeiten zu erklären ist. So laufen Wärmepumpen zum Beispiel häufiger, wenn es kalt ist. Diese kälteren Zeiten korrelieren oftmals mit einem geringen Sonnenschein und damit mit einer kleinen Photovoltaikerzeugung. Wird nun ein Datenkanal integriert, so erhalten die Endgeräte eine Netzsysteminformation, um abschätzen zu können, wie vorteilhaft der Leistungsbezug zu bestimmten Zeiten ist (Abbildung 44, rote Komponenten). Zur Umsetzung des neuen, zusätzlichen Kommunikationsnetzes wird das sogenannte CLS-Signal genutzt, in dessen Berechnung das Wetter, der Markt und das Netz einfließen. Das lokale Wetter wird zur Berechnung des lokalen Strommixes genutzt, der Markt, um die Bezugskosten zu verringern und gleichzeitig den Anteil an erneuerbaren Energien im Mix zu erhöhen [Anhang: Korrelationsuntersuchung] [Anhang Beschreibung des CLS-Signals].

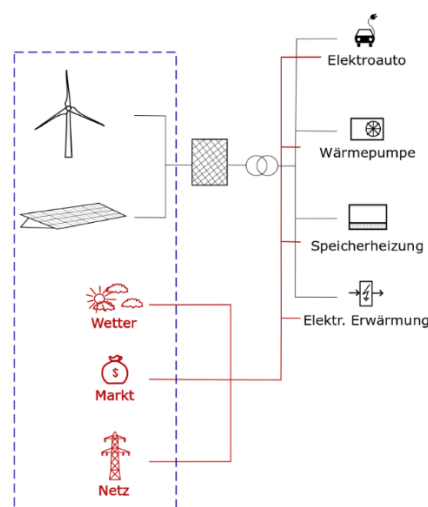


Abbildung 44: Schematische Darstellung des Netzes mit erneuerbaren Energieträgern und den größten Verbrauchern im Stromnetz; ergänzt um eine Informationsstruktur in Rot, die das Wetter, den Markt und die aktuelle Netzsituation mit einbezieht

Dieses Signal wird im späteren EMS implementiert und in die Zielfunktion der Optimierung aufgenommen. Dadurch lässt sich der Bezug von erneuerbarer Energie aus dem öffentlichen Stromnetz erhöhen, während der Bezug von konventioneller Energie zurückgeht.

### **8.3 Energiemanagement Konzept**

Das Energiemanagementkonzept im Museumsbau basiert auf einer kontinuierlichen Neubewertung der aktuellen und zukünftigen energetischen Situation im Museumsbau. Ziel des Energiemanagements ist es dabei, elektrische Energie in den Zeiten zu verbrauchen und im Gebäude zu speichern, wenn die korrelierten Emissionen für die elektrische Energiebereitstellung möglichst niedrig sind. Dadurch verringert das Energiemanagement Emissionen und wirkt praktisch netzdienlich, indem hauptsächlich zu den Zeiten Energie aus dem öffentlichen Stromnetz entnommen wird, wenn viele erneuerbare Energien im Netz vorhanden sind.

#### **8.3.1 Betriebsstrategie / Ablauf**

Das Energiemanagement erzeugt optimierte Betriebspläne indem folgende vier Schritte kontinuierlich abgearbeitet werden:

- 1) Erfassen der aktuellen energetischen Situation im Museumsbau:  
Alle Systeminformationen die in den Prognosen und Berechnungsalgorithmen betrachtet werden, werden durch das Energiemanagement zyklisch abgerufen, um den aktuellen energetischen Zustand zu definieren. Diese Größen lassen sich clustern, indem nachfolgende Energiebereiche unterschieden werden:

Elektrische Energie:

- Elektrische Leistung der Ausstellung
- Elektrische Leistung der Büros
- Elektrische Leistung der Hilfsflächen
- Elektrische Leistung der WP- Anlage
- Elektrische Leistung der Lüftungsanlage
- Elektrische Leistung der PV Anlage

Thermische Energie

- Kältespeichertemperaturen
- Wärmespeichertemperaturen
- Quelltemperaturen
- Raumtemperaturen
- Mischerkreistemperaturen

Wetter:

- Außentemperatur
- Luftfeuchte
- Einstrahlung
- Niederschlag

Klima & Allgemeines:

- Raumfeuchten
- CO<sub>2</sub> Anteile Raumluft
- Besucheranzahl / Besucherstrom

Diese Systeminformationen werden im Anschluss als Startwerte automatisch in die Prognose-Algorithmen übertragen. Zusätzlich werden aus dem Netz sowohl eine lokale Wettervorhersage als auch Standortdaten für die lokalen EEG Energieerzeugungsanlagen geladen. Diese werden ebenfalls an die Prognoseeinheit übergeben.

- 2) Prognose der zukünftigen Energieflüsse (Bedarfe & Einträge)  
Die Prognose
- 3) Berechnung eines optimierten Betriebsplans für alle steuerbaren elektrischen Großgeräte
- 4) Ansteuerung der elektrischen Großgeräte

Die Ansteuerung der elektrischen Großgeräte erfolgt entweder über die GLT oder direkt per TCP/IP-Modus Übergabe an die Geräteregelelungen selbst.

## 8.4 Monitoring

### 8.4.1 Hardware

Das Monitoring Konzept (Abbildung 45) umfasst die Erhebung von elektrischen Verbrauchsdaten durch Smartmeter, sowie die Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit durch Sensor-Stationen. Die Datenerhebung lässt sich sekundlich durchführen, skaliert jedoch mit der Anzahl der abzurufenden Geräte. Diese Anzahl lässt sich nahezu beliebig wählen, sodass je nach Anforderung eine individuelle Abdeckung umsetzbar ist. Die Anbindung der Messgeräte erfolgt per LAN oder WLAN, um auch an entfernten Bereichen ohne LAN-Anbindung Daten erheben zu können.

Im LAN/ WLAN werden die Messdaten per Modbus TCP an den Server übertragen. Dieser sammelt die Messdaten der Smartmeter und Sensorstationen und speichert sie ab. Die lokale Speicherung stellt sicher, dass die Messung auch ohne Internetverbindung durchgeführt wird und die Messdaten nicht in Hände Dritter gelangen.

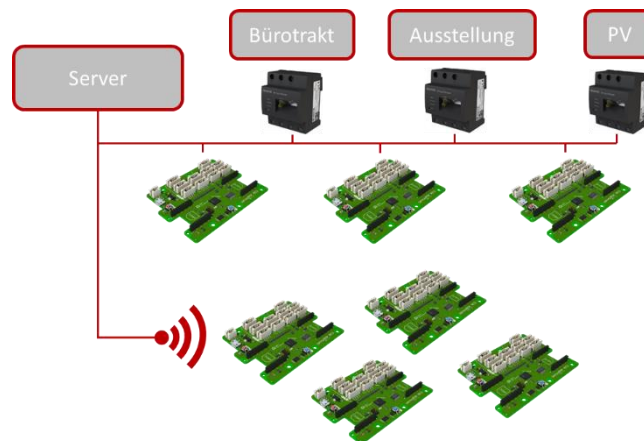


Abbildung 45: Schematische Darstellung des Monitoringkonzepts. Smart Meter und Senseboxen sind skalierbar über einen Modbus TCP/IP verbunden.

Die bereichsweise elektrische Datenerhebung durch Smartmeter ermöglicht eine präzise Auswertung der gesammelten Messdaten. Somit lässt sich beispielsweise der Energiebedarf des Bürotraktes von dem der Ausstellung trennen, sowie die eingespeiste PV-Leistung separat erfassen. Gleiches gilt für die Sensor-Stationen. Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur lassen sich an verschiedensten Orten im Gebäude erfassen, um einen umfangreichen Überblick zu erhalten.

Smartmeter sind intelligente Zähler, die über eine Kommunikationsschnittstelle auch Daten senden und empfangen können, um z.B. dem Energieversorger aktuelle Verbrauchsdaten des Anschlusses

zu übermitteln. Die für den Einsatz bestimmten Energy Manager EM300 von TQ-Automation messen für jede Phase alle elektrischen Größen: Strom, Spannung, Phasenwinkel Wirk-, Schein- und Blindleistung. Bei Stromstärken über 63A besteht weiterhin die Möglichkeit des Anschlusses von externen Stromsensoren, sodass eine Messung von Strömen bis 1000A umsetzbar ist. Die Geräte werden direkt in der Elektroinstallation eingesetzt und unterliegen keinerlei Wartung. Sie legen den Grundstein zu einem intelligenten Energieversorgungsnetz.

Bei den Sensor-Stationen handelt es sich um die senseBox:home. Sie basiert auf einem Arduino Microcontroller, welcher mittels externer Sensoren die Luftfeuchtigkeit und Temperatur misst. Der Microcontroller lässt sich beliebig programmieren, sodass eine Erweiterbarkeit jederzeit gegeben ist. Die Elektronik wird geschützt in einem Installationsgehäuse installiert. Der Aufstellungsort kann durch LAN oder WLAN-Anbindung optimal gewählt werden, sodass das Monitoring flächendeckend geschieht.

### 8.4.2 Qualität der Messwerte

Sensor-Station und Smartmeter lassen sich sekundlich abrufen, die Messdaten werden auf dem Server zusammengefügt und gespeichert. Je nach Anzahl der abzurufenden Geräte skaliert die Zykluszeit des Abrufes, sodass die genaue zeitliche Auflösung erst mit der bekannten Anzahl von Smartmetern und Sensorstationen abgeschätzt werden kann.

Die Temperatur wird von einem Texas Instruments HDC 1080 Sensor erfasst, welcher  $\pm 0,2K$  genau arbeitet. Dabei kann er die Temperatur von  $-40^{\circ}C$  bis  $+125^{\circ}C$  messen. Die nachfolgende Kurve besteht aus Messwerten an einem Büroarbeitsplatz. Deutlich zu erkennen sind die Temperatureinbrüche zum Tagesbeginn. Diese sind auf das Lüften des Büros zurückzuführen. Schwankungen, die sich im Tagesverlauf abzeichnen, sind den Thermostaten der Heizung geschuldet, welche immer wieder öffnen und schließen, um den eingestellten Temperatursollwert einzuhalten. Zugehörig zur Temperatur, ist die Luftfeuchtigkeit (Abbildung 46 b)) dargestellt. Sie wird auch mit dem HDC 1080 gemessen, die Genauigkeit liegt bei  $\pm 4\%$ . Beim Lüften fällt auch die relative Luftfeuchtigkeit im Raum deutlich ab. Es zeichnen sich deutliche Sprünge ab, wie sie zuvor bei der Raumlufttemperatur ersichtlich waren. Gut zu erkennen ist auch die steigende Luftfeuchtigkeit während der Arbeitszeit. Eine solche Auswertung, inkl. der Einhaltung der ASHREA-Standards, ist mit einer flächendeckenden Erfassung im nachhaltigen Museum möglich.

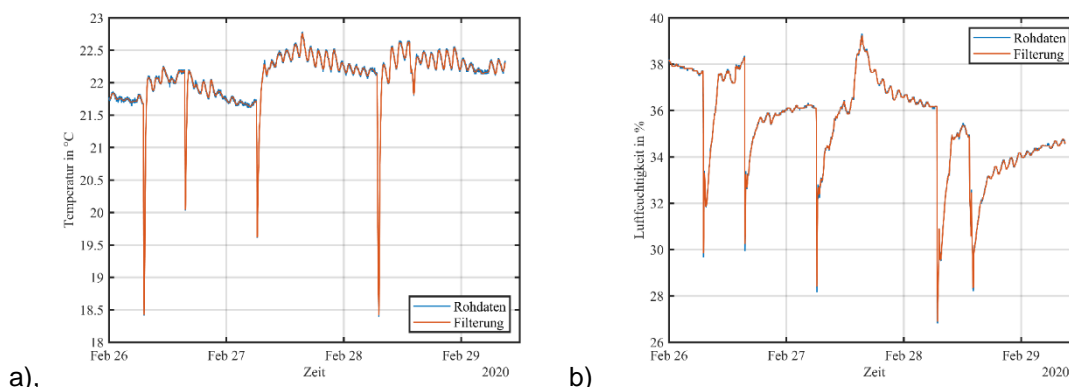


Abbildung 46: a) Temperaturverlauf einer im Innenbereich aufgestellten Sensorstation. b) Luftfeuchtigkeitsverlauf einer im Innenbereich aufgestellten Sensorstation. Jeweils mit Datenfilterung.

Elektrische Messungen werden mit dem Smartmeter von TQ-Automation durchgeführt. Der Energy Manager EM300 misst Wirk-, Schein- und Blindleistung mit einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$ . Die Ge-

nauigkeit für Spannung und Strom gibt TQ-Automation entsprechend mit  $\pm 0,5\%$  an. Aus der Messung des Smartmeters ergibt sich beispielhaft der folgende zeitliche Verlauf der Wirkleistung (Abbildung 47). Die Darstellung umfasst die gemessene Wirkleistung auf allen drei Phasen.

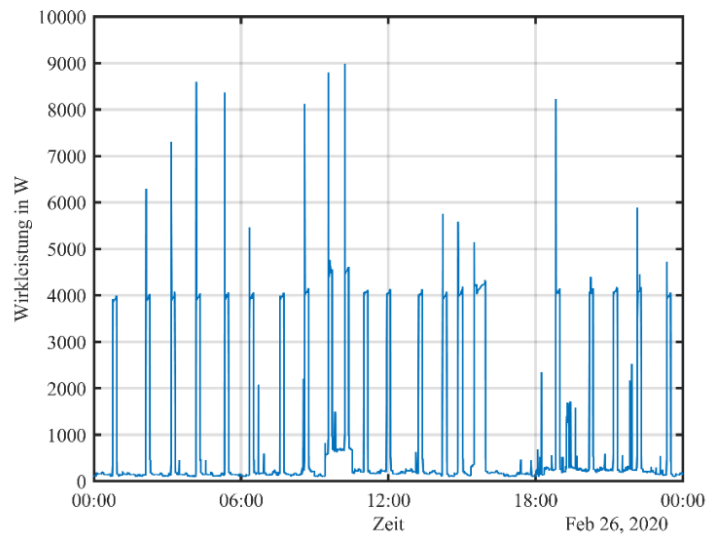


Abbildung 47: Wirkleistungsverlauf eines Haushaltes mit Wärmepumpe gemessen mit dem EM300.

### 8.4.3 Kostenübersicht Monitoring

Die Kosten eines einzelnen Smartmeters belaufen sich auf ca. 450€. Die Sensorstation mit der Möglichkeit zur Messung von Luftfeuchte und Raumtemperatur hat einen Stückpreis von 125€. Eine Erweiterung der Sensorstation um einen CO<sub>2</sub> Sensor ruft Hardwarekosten in der Höhe von 30€ auf. Die Leistungsaufnahme eines Smartmeters beträgt ca. 5W, wodurch Betriebskosten bei einem Strompreis von 30ct/kWh in Höhe von etwa 13,14€ entstehen. Die Leistungsaufnahme einer Sensorstation liegt um 1W, sodass jährlich ca. 2,63€ anfallen.

## 9 Fazit/ Offene Fragestellung (zukünftiger Forschungsbedarf)

Die Ausgangssituation der Analysephase (AP1) war die Überprüfung einer möglichen Übertragbarkeit von traditionsbehafteten Baustoffen und Konstruktionsweisen für die ressourcenschonende Anwendung im modernen großmaßstäblichen Museumsbau mit dem Schwerpunkt der konstruktiv tragenden Materialien (Holz, Lehm und Öko-Beton) sowie Ausbaumaterialien. Das Ziel der Forschungsphase I bestand darin, Potenziale und Handlungsempfehlungen für den ökologisch nachhaltigen Umgang dieser Baustoffe für die Anwendung im modernen Museumsbau aufzuweisen.

In der Analysephase konnte ein eindeutiges Potenzial herausgearbeitet werden, den historischen Holzbau dank automatisierter Fertigungstechniken und digitaler Planungsprozesse neu zu interpretieren und auf Großbauten zu übertragen. Es hat sich gezeigt, dass moderne und hochbeanspruchte Holz-Holzverbindungen (noch) Sonderlösungen darstellen, sodass die Konzipierung eine individuelle Betrachtung der Konstruktion sowie einen umfangreichen Planungsprozess voraussetzt. Der Status Quo verdeutlicht, dass Holztragwerke moderner Großprojekte, auch wenn Verbindungsmittel aus Holz zur Anwendung kommen, überwiegend aus Leimholz bestehen. Um den konstruktiv anspruchsvollen (Ingenieurs-)Holzbau zukünftig, durch eine schrittweise Annäherung und Rückkehr zum traditionellen Holzbau, ökologisch zu optimieren, besteht weiterer Forschungsbedarf, hinsichtlich der konkreten Umsetzbarkeit und den Effekt auf die tatsächliche Nachhaltigkeit von:



- leimarme/ leimfreie Holzquerschnitte (z.B. Fachwerkträger, verzahnter Träger oder Ähnliches)
- stahl- und leimfreie Fügeverfahren
- Holz-Holz-Verbindungen

Beton ist für viele Anwendungsbereiche im Kontext moderner Großbauten und dem LWL Museumsneubau in Detmold im Speziellen, nur schwer zu ersetzen und unverzichtbar. Aufgrund dieser Tatsache, einer prognostizierten global steigenden Nachfrage sowie signifikant negativer Auswirkungen auf Klima und Ressourcenabbau, ist es zwingend notwendig einen Paradigmenwechsel im Umgang mit Beton voranzutreiben und eine Vorbildfunktion einzunehmen. Dazu konnten verschiedene „Stellschrauben“ herausgearbeitet werden, den ökologischen Fußabdruck von Beton zu verringern und das Material ressourcenschonender einzusetzen. Mit der richtigen Auswahl, der zurzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, kann das Material und die Bauweise bestmöglich optimiert und richtungsweisend für den nachhaltigen Einsatz von Beton eingesetzt werden.

Parallel zur Entwicklung des Ökobetons und der technischen Umsetzbarkeit von Betonbauteilen mit einem niedrigeren CO<sub>2</sub> Abdruck, besteht das Ziel die Umsetzbarkeit auf der Baustelle und die daraus resultierenden Planungsanforderungen für zukünftige Bauvorhaben aufzuarbeiten und öffentlich zur Verfügung zu stellen.

Mit Blick auf die ökologischen Vorteile und ein weites Anwendungsfeld von Lehmprodukten, konnte ein hohes Anwendungspotenzial für den Einsatz im modernen Museumsbau für konstruktiv tragende und nichttragende Funktionen festgestellt werden. Tragender Lehm (ohne Zusatzmittel) stellt für Bauaufgaben dieser Größenordnung eine Ausnahme dar. Zwar wurden Planungs- und Fertigungstechniken besonders im Bereich Stampflehmtechnik in den letzten Jahren so weiterentwickelt, dass die Anwendungsbereiche enorm erweitert wurden, jedoch mangelt es noch an einer größeren Zahl von Referenzobjekten und somit an praktischer Erfahrung. Die Voraussetzung der statischen Berechnung sowie die technische Umsetzbarkeit für anspruchsvolle Anwendungsbereiche sind dazu potenziell gegeben. Hier gilt es, durch innovative und zukunftsweisende Projekte und Forschungsarbeit, den Lehmbau zu fördern. Die Art der Herstellung, Vorort-Produktion (Feldfabrik) oder werkseitige Vorfertigung, der Bauteile aus Lehm sollen aus wirtschaftlicher, ökologischer und planungstechnischer Sicht bewertet werden. Das Weiteren bietet der Einsatz einer digitalen und robotergestützten Fertigung von Stampflehmwänden weiteres Optimierungspotenzial der Stampflehm-Bauweise, das im Rahmen dieses Projekts auf eine großmaßstäbliche Anwendbarkeit geprüft werden soll.

Über die bisherigen Untersuchungen zur Ökobilanz konnte gezeigt werden, dass zur vollständigen Beurteilung eines Materialeinsatzes die in der Regel nicht dargestellten Transporte zur Baustelle möglicherweise einen nicht unwichtigen Faktor in der Bilanz darstellen. Aus diesem Grund soll versucht werden möglichst alle Materialien aus einem Umkreis von ca. 200 km zu beschaffen, dies mit all seinen Schwierigkeiten zu dokumentieren und natürlich die Auswirkungen auf die ökologische Qualität von Materialien und Gebäude darzustellen. Bei der Betrachtung der regionalen Verfügbarkeit (Radius von 200km um Detmold) von traditionellen Rohstoffen aus nachhaltigen Rohstoffquellen konnte im Rahmen der ersten Forschungsphase für eine Vielzahl der Baustoffe, wie Holz, Lehm, Naturstein und Stroh, ein potenzielles Vorkommen nachgewiesen werden. Baustoffe, wie z.B. veredelte Holzprodukte, Holzwerkstoffplatten und Dämmstoffe, können aus hiesigen Rohstoffquellen bestehen, setzen jedoch die Verarbeitung in hoch spezialisierten Produktionsstandorten voraus. Trotz der Identifikation einiger regionaler Produktionsstandorte (z.B. für Holzwerkstoffplatten) konnte die

vollständige Betrachtung der Wertschöpfungskette aller potenzieller Materialien im Rahmen der ersten Phase nicht vollständig abschlossen werden und wird als Ziel der zweiten Forschungsphase definiert. Neben dem direkten Einfluss der minimierten Transportenergie soll die Machbarkeit dieser Zielvorgabe im Kontext von Planung, Formalvorgaben einer öffentlichen Ausschreibung und der tatsächlichen Umsetzbarkeit durch die regionale Baustoff- und Bauprodukteindustrie untersucht und für zukünftige Bauvorhaben aufbereitet werden. Somit soll projektübergreifend der Einfluss entsprechender Zielvorgaben auf die Realisierung nachhaltiger Gebäude geprüft werden.

Die Rückbaubarkeit einer Konstruktion entscheidet darüber, ob eine hochwertige Nachnutzung, (Wiederverwendung, Recycling oder Kompostierung) der Baustoffe und Bauteile möglich ist. Aufgrund von ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten sowie der Verknappung von nicht nachwachsenden Rohstoffen ist die Zugänglichkeit von Baustoffen nach Ende des Lebenszyklus von großer Bedeutung und soll bereits bei der Planung des Gebäudes berücksichtigt werden. Dazu soll die Lösbarkeit der Verbindungen des Holztragwerks der Bauteile aus Beton und Lehm aus ihrem architektonischen Kontext sowie die sortenreine Trennung in die einzelnen Bestandteile und die resultierenden Auswirkungen auf den Planungsprozess untersucht und aufgearbeitet werden.

Die unterschiedlichen Parameterstudien zum Einsatz von Lehm in Form von massiven Stampflehmwänden wie auch von Plattenware zur Bekleidung der Deckenbauteile haben unter bauklimatischen Aspekten eindeutige Vorzüge des Materials gegenüber anderen üblichen aufgezeigt. Lehm vermag dank seiner Masse und der damit verbundenen hohen Wärmespeicherefähigkeit Schwankungen der Temperatur hervorgerufen durch Luftaustausch (mit anders temperierten Innenräumen oder mit der Außenluft) bzw. innere Lasten kurz- und mittelfristig nennenswert zu mindern. Langfristige Temperaturentwicklungen, die sich saisonbedingt über Monate einstellen, können insgesamt als unproblematisch angesehen werden, da sich diese angesichts einer gut wärmegeprägten, vorrangig opaken Gebäudehülle in einem großen, kompakten Gebäude tendenziell innerhalb des Bereichs der Langzeitvorgaben nach ASHRAE-A1 bewegen.

Das im Vergleich zu anderen massiven Baustoffen deutlich bessere Feuchtespeichervermögen reduziert überdies noch Feuchteschwankungen infolge des Feuchtigkeitseintrags durch Lüftung und Besucherverkehr. Auch hier kann diese positive Pufferwirkung naturgemäß nur kurz- bis mittelfristig erfolgen, langfristig muss ein regulierender Ein- bzw. Austrag der Feuchtigkeit über den Luftaustausch erfolgen. Insgesamt wird der Einsatz von Lehmprodukten, insbesondere der Einbau starker Stampflehmwände, im Ausstellungs- und Depotbereich angesichts der gewünschten Klimastabilität als wichtige strategische raumklimatische Komponente angesehen, die eine permanente, jeweils sehr kurzzeitige „Überregulierung“ durch die Vollklimaanlage unnötig macht. Hierdurch wird ein spürbares haustechnisches Einsparpotenzial bei Investition und im Betrieb erwartet. Messungen der thermisch-hygrischen Verhältnisse in den Lehmteilen und an deren Oberflächen sowie der Raumluft in Form des geplanten Klima- und Energiemonitorings während des Museumsbetriebs helfen, das Potenzial des historischen Baustoffs in der kontemporären Architektur weiter zu identifizieren.

Auch das Erdreich stellt einen natürlichen und ohnehin vorhandenen Wärmespeicher dar. Weil bei Museen weniger die Sicherstellung eines konkreten Temperaturniveaus als vielmehr die Unterbindung thermischer und hygrischer Schwankungen gewisser Größen von Belang ist, unterstützt eine ausdrückliche Kopplung von klimatisch anspruchsvollen Räumen und Erdreich die Temperaturstabilität im Museum enorm. Dies bedeutet also einen bewussten Verzicht auf dicke Dämmschichten zum Erdreich hin und damit einen Paradigmenwechsel im Hinblick auf den baulichen Wärmeschutz. Um den Einfluss des Außenklimas sowie der Witterung auf das Raumklima jedoch weitestgehend zu mindern, sind wie die außenluftberührte Gebäudehülle ebenso erdberührte Außenwände bzw.

Bodenplatten im Randbereich über mehrere Meter Tiefe wirksam gegen Wärmeverlust zu dämmen; noch tiefer im Erdreich liegende Bereiche der Außenwände oder der Großteil der Bodenplatte selbst müssen nicht oder nicht im gleichen Maße wärmegeklämt werden. Gerade bei großflächigen, kompakten erdberührten Bauteilen (mit großem Bodenplattenmaß) bildet sich unterhalb der weniger oder ungedämmten Bodenplatte ein Wärmesee, der als Langzeitspeicher bei entsprechend tiefen Grundwasserspiegel über das Jahr dienen kann. Angesichts der auch international nur spärlich durchgeführten und publizierten Temperatur-Langzeitmessungen an erdberührten Bauteilen und den unterhalb der Gründung befindlichen Erdmassen werden von den im Rahmen des Projekts vorgesehenen Untersuchungen weitere wichtige Erkenntnisse zu sinnvollen Dämmstandards und materialeffizienten Dämmstoffeinsatz erwartet.

Die Analyse der Übertragbarkeit traditionsbehafteter Materialien, für Anwendungen im Ausbau (z.B. Dämmstoffe, Ver- und Bekleidungen), hat gezeigt, dass Rohstoffe aus ökologisch nachhaltigen und nachwachsenden Rohstoffquellen in vielen Anwendungsbereichen konventionelle (Massen-)Baustoffe substituieren können. Wiederum konnten bauphysikalische Grenzen dieser Baustoffe aufgewiesen werden, sodass die Substitution durch möglichst nachhaltige Produkte aus nicht-nachwachsenden Rohstoffquellen im Einzelfall und unter ganzheitlich nachhaltigen, zuzüglich wirtschaftlichen Aspekten, geprüft werden müssen.

Eine gangbare Strategie zum Nachhaltigen Gebäudebetrieb in klimatisch unkritischen Räumen oder in Außenbereichen des Museums mit Arbeitsplätzen kann es sein, örtlich begrenzt wirkende Zusatzheiz- und -kühlsysteme vorzusehen, die ggf. aufbauend auf eine gewisse Grundtemperierung bereitstellendes Primärsystem die Restwärme oder -kälte zur Erreichung der Komforttemperatur liefern. Ein Vorteil dieses Grundkonzepts ist es weiterhin, dass jeder Nutzer die gewünschten individuellen Temperaturbedingungen separat wählen und ansteuern kann. Die sogenannten Adaptiven Komfortsysteme (AKS) umfassen Komponenten zur Erwärmung und/oder Kühlung unterschiedlicher Körperteile und ermöglichen verschiedenen Recherchen zufolge bei Büroarbeitsplätzen je nach Einsatzbedingungen große Einsparungen bei gleichzeitig hohem Nutzerkomfort. Die weitere Gebäudeplanung wird zeigen, ob deren Einsatz an bestimmten Arbeitsplätzen zweckmäßig und empfehlenswert ist.

Pflanzen bewirken, wie eigene Klima- und CO<sub>2</sub>-Messungen unter Laborbedingungen wie auch in real genutzten Büroräumen zeigen eine Verbesserung der Raumluft in Bezug auf einen verringerten CO<sub>2</sub>-Gehalt in Räumen. Umfangreiche Recherchen bestätigen diese Wirksamkeit und unterstreichen zudem die Reinigungswirkung von Grünpflanzen bzgl. vieler z.B. karzinogener Schadstoffe, die über Möbel und Innenausbau aber auch infolge des Betriebs von (Büro-)Geräten emittiert werden. Raumklimatisch positiv wirken Pflanzen bei sommerlichem Klima infolge Verdunstung, weil sie raumtemperatursenkend wirken: das vom Erdreich, vor allem aber von den Blättern verdunstende Wasser bindet latente Wärme, führt aber gleichermaßen zu einer leichten Erhöhung der Luftfeuchtigkeit. Dieser Effekt ist im Winter, bei üblicherweise eher trockener Heizungsluft willkommen. Da sich die Vorzüge des Kühleffekts während des Heizbetriebs allerdings in Form eines erhöhten Heizwärmebedarfs auswirkt, ist sein energetischer Nutzen zu diskutieren. Zudem sind mehrere mittelgroße Grünpflanzen in jedem Raum notwendig, um nennenswerte Einflüsse auf das Raumklima zu erzielen.

Im Arbeitspaket Energie wurde ausgehend von thermischen und elektrischen Energieflüssen ein Energieflussmodell für den Museumsneubau aufgestellt. Um dieses Modell zu Parametrieren wurden in diesem ersten Schritt Schätzwerte eingesetzt. Sobald die Planung und die Konstruktion die entsprechenden Daten kann das Modell mit den finalen Werten aktualisiert werden. Eine Analyse

des resultierenden Energiebedarfs für elektrische und thermische Energie liefert die energiebasierten CO<sub>2</sub> Emissionen des Museumsbaus.

Zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Steigerung der Netzdienlichkeit für das öffentliche Stromnetz können Energiemanagementsysteme (EMS) eingesetzt werden. Um das Potenzial für den Einsatz eines EMS auszuloten wurden ein perfektes EMS auf Tagesbasis modelliert und auf die angewandt. Es zeigt sich, dass bis zu 33% der CO<sub>2</sub> – Emissionen für den Heizbetrieb durch ein EMS vermieden werden können. Obwohl die Modellierung der Wirkung eines perfekten EMS nicht kompliziert ist, ist im Gegensatz dazu die konkrete Umsetzung aktuelles Forschungsthema.

Zukünftige Arbeiten liegen in der mathematischen Modellierung der detaillierten Energieverlustmechanismen für den konkreten Museumsbau. Diese Modellierung besteht aus mehreren gekoppelten Sätzen von Differentialgleichungen, die es erlauben einen digitalen Zwilling für einzelne energetische Komponenten zu erstellen. Dadurch kann die energetische Reaktion des Gebäudes vorherberechnet werden. In Kombination mit den digitalen Zwillingen der Energieerzeugungs- und Verteilungsanlagen ergibt sich ein mathematisches Gesamtbild des Museumsgebäudes.

Eine weitere Forschungsfrage ist Auswahl eines passenden Optimierungsalgorithmus. Unterschiedliche Algorithmen liefern bei verschiedenen Rechenzeiten unterschiedlich gute Ergebnisse. Die modernsten EMS nutzen oftmals eine Kombination aus klassischen Optimierungen, Algorithmen der künstlichen Intelligenz und Expertenwissen. Ebenso von aktuellem Forschungsinteresse sind Fragen der Netzdienlichkeit: Wie können Verbraucher wie das Museum rückkopplungsfrei mit dem Energieversorgungsnetz kommunizieren und welchen Einfluss auf das öffentliche Netz kann durch den Einsatz eines EMS erreicht werden.

Zur Vorbereitung dieser Arbeiten sind in der Bauphase (Projektphase 2) elektrische Monitoringsysteme in die elektrische Verteilung zu planen und zu integrieren. Nur dadurch können im späteren Betrieb die entsprechenden Daten in Echtzeit aufgenommen werden und als Grundlage für ein EMS dienen.

## **10 Didaktischer Ausblick**

### **10.1 Gesellschaftliche Verantwortung und museale Bildungskommunikation**

Museen sind Quellen historischen Wissens und Hüter des materiellen Kulturerbes. Damit und aufgrund ihrer kulturfachlichen Möglichkeiten sollten sie zeigen, wie sie zu einer nachhaltigen Zukunft beitragen können und gesellschaftliche Verantwortung übernehmen. Zentrale Kernkompetenz der Museen ist informelle Bildung. Eine weitere Stärke ist, dass die Kulturtechnik des Museumsbesuchs sich durch den gesamten politischen Wandel im Europa der vergangenen 200 Jahre erhalten hat. So bieten sich den Museen besondere Chancen, *gate keeper* bei der Gestaltung der Bildungskommunikation auch des 21. Jahrhunderts zu sein. Diese Gelegenheit wird auch der Neubau des LWL-Freilichtmuseums Detmold, Westfälisches Landesmuseum für Alltagskultur nutzen. Relevante Arbeitsfelder sind Ökologie, Ökonomie, Soziales und nachhaltige Programmatik. Von der Sonderausstellung bis zum neuen Museumsbau bietet sich das gesamte Spektrum didaktischer und pädagogischer Ansätze der Kulturvermittlung und der Museumspädagogik. Die Expertise des Museums in den alltagsbezogenen Bereichen Historisches Bauen, Landschaftsökologie sowie Wohnen bildet den „roten Faden“, über den im Neuen Eingangs- und Ausstellungsgebäude Zugänge für verschiedene Zielgruppen entwickelt werden.

## **10.2 Baumaterialien und Gebäudestruktur mit Blickachsen im Wissensfokus**

Die Konstruktion des neuen, musealen Gebäude-Ensembles beruht auf Holz und Lehm, in einzelnen Teilen auf Beton. Als Vorzeigeprojekt soll der Museumsneubau durch sein modernes und funktionales Design überzeugen aber auch durch Nachhaltigkeit. Jedes museale, aber auch jedes fachliche Thema könnte eine eigene kommunikative Identität bilden, die den Museumsgästen die Orientierung erleichtern soll. Kenntnisse und Fertigkeiten zu den Baumaterialien Holz und Lehm, die sich auch unter Einbeziehung der musealisierten Gebäude sowohl theoretisch als auch praktisch in Workshop und Projektarbeit aufarbeiten lassen, werden bereits baubegleitend ab 2021 entwickelt, evaluiert und partizipativ auf die Umsetzung in den Räumen des Neubaus hin fortentwickelt.

Verschiedenartige Öffnungen und die drei unterschiedlich orientierten Baukörper ergeben in den Innenräumen der neuen Gebäude während der Öffnungszeiten von 9 bis 20 Uhr immer wieder großzügige Belichtungsflächen und Ausblicke in verschiedenste Richtungen des Museumsbaus und des Areals. Dazu gehören sowohl die Blickbeziehungen zum Park – hier sind historische Fakten ebenso wie Themen zur Kulturlandschaft anknüpfbar (medial/per App/Texttafel) - als auch zu den Großexponaten des Museumsgeländes wie z.B. der Wassermühle mit ihrer Fachwerkstruktur und der nachhaltigen Energiegewinnung. Der direkte Sichtvergleich macht Unterschiede als auch Gemeinsamkeiten historischer Fachwerkgefüge mit der modernen Holzkonstruktion erkennbar. Die kultur- und technikgeschichtlichen Aspekte können sowohl mediengestützt (Tablet; Apps), als auch über die personale Vermittlung aufgegriffen und zielgruppengerecht vermittelt werden. Andere Fragen der Nachhaltigkeit lassen sich auch in Bezug auf den Umgang mit Denkmälern außerhalb des LWL-Freilichtmuseums in partizipativer Form einbringen. Denkmäler bieten Anknüpfungspunkte für gegenwartsrelevante Themen wie den Schutz der Demokratie oder den Schutz unserer Umwelt. Die Nutzungsdauer, die gerade im Falle der musealisierten, historischen Gebäude intergenerationell ist und die Art des gemeinschaftlichen Gebrauchs – neben dem Errichten, dem Wohnen und der Lebensgestaltung und der wirtschaftlichen Nutzung - machen die Wohn- oder Wirtschaftsgebäude zum Teil einer gemeinschaftlichen Umwelt. Die Großexponate sind besonders geeignet, partizipative und teilhabende Lern – bzw. Vermittlungskonzepte zu planen und umzusetzen.

Die Räume des Museumsbaus sind offen konzipiert: Dynamische Lernbereiche bieten flexible Trennwände und z.B. gemeinschaftliche Sitzstufen im Bereich des Open Space, damit entstehen Chancen für individuelle Betrachtung, für Workshops und klassische Führungen, aber auch für Projektimpulse aus der Praxis und kreative Aktionsideen. Lehmoberflächen, aber auch z.B. hölzerne Elemente ermöglichen die Wahrnehmung der Veränderungen in der Gebäudeoptik durch den Tageslauf, allein schon über Schattenwurf und Tageszeit. Für Phase 2 zu erarbeiten wäre ein Konzept, diesen optisch wahrnehmbaren Wandel durch den Jahres- und Tageslauf in eine individualisierte Vermittlungsplanung einzubeziehen, die an jedem Tag des Jahres auch unter Nutzung des Umfelds variiert. Es entstehen multifunktionale Projektflächen für interdisziplinäre Zusammenarbeit bei Arbeitsmaßnahmen für externe und interne Nutzer. Anordnung sowie Einrichtung der Abteilungen und Büros sollen Wegstrecken minimieren und Co-Working ermöglichen.

## **10.3 Mediengestützte Planung des Museumsaufenthaltes: Verringerung des Carbon Footprint**

Optionale und individuelle Informations- und Servicestruktur: Schon aktuell ist das Angebot des LWL-Freilichtmuseums umfangreich, ein einzelner Museumsaufenthalt reicht dafür nicht aus. Die durchschnittliche Besuchsdauer = (2019) bei 4,5 bis 5 Stunden, wird mit der Nutzung des Neuen Eingangs- und Ausstellungsgebäude diversifiziert. Die Aufbereitung der Didaktik zum Museumsbau wird in den Kommunikationskontext der Empfangs- und Orientierungssituation eingebettet werden.

Sie soll sich nicht in einem Zahlendisplay mit Temperatur, Luftfeuchte oder anderen Werten erschöpfen. Die Ausführungen zum Bau des Museumgebäudes im Bereich der Baumaterialien (Holz-Lehm-Beton) und der Holzkonstruktion (z.B. Verwendung recycelter Elemente) gehören ebenso zur Vermittlung wie die Substitutionspotentiale (Solarthermie; Photovoltaik-Potenzial; Windkraft-Potenzial; Geothermie-Potenzial; regenerativer Wasserkreislauf) und die nutzerbezogenen Einflüsse (Wärme- und Humiditätsinput; Müll) während des Betriebs. Die Evaluation der Lernerfolge ist für eine mögliche Phase 3 – nach Inbetriebnahme des neuen Museumsbaus ab 2024 – geplant.

## 11 Literaturverzeichnis

- [Alb10] ALBAN: *Literature study on radiant heating in a thermally- comfortable indoor environment: a summary report*. Katholieke, Universiteit Leuven, 2010.
- [App18] APP, J.: *Die 5 besten Pflanzen für Ihr Schlafzimmer*. 2018. URL: <https://www.tb-guide.de/ratgeber/gesundheit/natuerliche-einschlafhilfe-die-5-besten-pflanzen-fuer-ihr-schlafzimmer>. Abruf: 13.11.2020.
- [BAF20] BUNDESAMT FÜR UMWELT (CH), (Herausgeber) Zustand des Waldes, Url: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wald/fachinformationen/waldzustand-und-waldfunktionen/holzproduktion.html>, Abgerufen am 12.06.2020
- [BBB06] BISCHOF, W., BLANK, H., BORSCH-LAACKS, R.: *Fensterlüftung und Raumklima. Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2006.
- [BBCA98] BAUMAN, F., A. BAUGHMAN, G. CARTER, AND E. ARENS: *A Field Study of PEM (Personal Environmental Module) Performance in Bank of America's San Francisco Office Buildings*. Center for the Built Environment, University of California, 1998.
- [BDML18] BAU-DOCH-MIT-LEHM, Lehmkarte, Url: <http://www.baudochmit-lehm.de/lehm/lehm.htm>, Abruf: 18.03.2021
- [Brec01] BRECHNER, E., ET AL.: Fotoperiodismus. 2001. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/fotoperiodismus/4362>, Abruf: 29.11.2018.
- [BreM20] Breunig, Morris, mit Fotos von Chr. Senti, *Alterssiedlung im Refresh*, Phoenix Forum, Ausgabe 01-2020
- [BIBH17] BUNDESMINISTERIUM FÜR INNERES; BAUEN UND HEIMAT (Herausgeber) Url: [www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen](http://www.nachhaltigesbauen.de/austausch/nutzungsdauern-von-bauteilen), letzter Zugriff: 12.06.2020
- [BMU19] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT(Herausgeber): *Ziele der Bundesregierung. Bis 2030 die Treibhausgase halbieren*.13.10.2019. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaziele-und-sektoren-1669268>. Abgerufen am: 21.04.2020.
- [BMU17] BMU (Herausgeber): *Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie*. 2017. URL: <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>. Abruf: 28.04.2020.
- [BMU19] BMU (Herausgeber): *Klimaziele*. 2019. URL: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm20301673578>. Abgerufen am: 21.04.2020.

- [Bgb08] BUNDESGESUNDHEITSBLATT: *Fotoperiodismus*. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Springer Medizin. 2008. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid\\_2008.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf), Abruf: 15.12.2018.
- [Bun] BUNDESUMWELTAMT (Herausgeber): *Bauabfälle o.J.* URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#verwertung-von-bau-und-abbruchabfallen>. Abruf 16.09.2020
- [BW] BAUNETZ\_WISSEN (Herausgeber): *Einsatzbereich für Linoleum*. o.J. URL: [https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/\\_linoleum/einsatzbereiche-fuer-linoleum-151712](https://www.baunetzwissen.de/boden/fachwissen/_linoleum/einsatzbereiche-fuer-linoleum-151712). Abruf: 7.05.2020.
- [bZe17] B.EYOND ZERO EMISSIONS (Herausgeber): *Rethink Cement*. 2017. URL: <https://bze.org.au/wp-content/uploads/rethinking-cement-bze-report-2017.pdf>. Abruf: 04.06.2020.
- [CLAU16] CLAUS, T.: *Die gereimte Zapfenverbindung – Ansätze zur Verbesserung von Holz-Holz-Verbindungen*. Conference Paper, Universität Kassel, 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/299278668\\_Die\\_gereimte\\_Zapfenverbindung\\_-\\_Ansätze\\_zur\\_Verbesserung\\_von\\_Holz-Holz-Verbindungen](https://www.researchgate.net/publication/299278668_Die_gereimte_Zapfenverbindung_-_Ansätze_zur_Verbesserung_von_Holz-Holz-Verbindungen). Abruf: 10.05.2020.
- [DBU18] DACHVERBAND LEHM E.V. (Herausgeber): *Muster UDP Lehmputz*, gefördert durch die DBU, Weimar 2018
- [1Dach] DACHVERBAND LEHM E.V. (Herausgeber): *Lehmbaumstoffe*, o.J. URL: <https://www.dachverband-lehm.de/lehmbau/lehmbaumstoffe>. Abruf: 16.04.2020.
- [2Dach] DACHVERBAND LEHM E.V. (Herausgeber): *Voralberg Museum*. o.J. URL: <https://www.dachverband-lehm.de/bauwerke/voraralberg-museum-bregenz>. Abruf: 14.05.2020.
- [Dach09] DACHVERBAND LEHM E.V. (Herausgeber): *Lehmbau Regeln*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 3. Auflage, 2019.
- [Dav15] DAVENPORT, C.: *Blattaufbau*. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Springer Medizin. 2008. URL: <https://scilogs.spektrum.de/von-menschen-und-mauesen/oh-tannenbaum/>, Abruf: 23.11.2018.
- [DEAB14] DACHVERBAND ENTWICKLUNGSPOLITIK BADEN-WÜRTENBERG (Herausgeber): *Natursteine nachhaltig beschaffen: für Umweltschutz und Menschenrechte!* 2014 URL: [http://fairstone.org/wp-content/uploads/sites/2/2015/03/woek-deab\\_2014\\_natursteine\\_nachhaltig\\_beschaffen.pdf](http://fairstone.org/wp-content/uploads/sites/2/2015/03/woek-deab_2014_natursteine_nachhaltig_beschaffen.pdf). Abruf: 4.05.2020
- [Deb17] DEBIAK: *Innenraumschadstoffe – aktuelle Richtwerte*. Umweltbundesamt. 2017. URL: <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/innenraumluftschadstoffe-aktuelle-richtwerte-und-gesundheitliche-bewertungen-aus-dem-ausschuss-fuer-innenraumrichtwerte-air.pdf>, Abruf: 02.01.2019.
- [DHMASKTL15] DECHANSTREITER, U., HORST, P., METTKE, A., ASMUS, S., SCHMIDT, S., KNAPPE, F., THEIS, S. und LAU, J.: *Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Baustoffen*. Texte | 93/ 2015, Umweltbundesamt, 2015.

URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_93\\_2015\\_wiederverwertung\\_von\\_bauteilen\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_93_2015_wiederverwertung_von_bauteilen_0.pdf). Abruf: 10.05.2020.

- [DET] DETAIL Business Information GmbH (Herausgeber) Holz im Großeinsatz: *Finanzpark in Stavanger von Helen & Hard und SAAHA*. O.J. URL: <https://www.structure-magazin.de/artikel/holz-im-grosseinsatz-finansparken-in-stavanger-von-helen-hard-und-saaha-35193/>. Abruf: 10.05.2020.
- [DGW16] DIEKMANN, S., GROCHTMANN, t., WIEDEMANN, P.: *Nachwachsende Rohstoffe. Informationsmaterial für Berufsbildende Schulen*. In: Zeitbild Fachmodul Dämmen und Dämmstoffe 2016. URL: <https://www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2017/07/Zeitbild-Nawaro-Fachmodul-Daemmung-1.pdf>. Abruf: 29.04.2020.
- [DIL07] Diel, H. & Röhling, S., *Bodenschätze der Bundesrepublik Deutschland*, Landkarte (BSK 1000), Hannover 2007
- [DKfz09] DEUTSCHES KREBSFORSCHUNGSZENTRUM: *Tabakatlas Deutschland*. 2009. URL: [https://www.dkfz.de/de/tabakkontrolle/download/Publikationen/sonstVeroeffentlichungen/Tabakatlas\\_2009.pdf](https://www.dkfz.de/de/tabakkontrolle/download/Publikationen/sonstVeroeffentlichungen/Tabakatlas_2009.pdf), Abruf: 07.12.2018.
- [DLF20] Röhrlich, D., *Sand-ein nur scheinbar unendlicher Rohstoff*; Onlineartikel, Deutschlandfunk, 2020, Url: <https://www.deutschlandfunk.de/sand-ein-nur-scheinbar-unendlicher-rohstoff.724.de.html>; letzter Zugriff am 17 03 2021
- [DGM17] DÖRING, P., GLASENAPP, S. und MANTAU, U.: *Holzwerkstoffindustrie 2015*. Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. 2017. URL: [http://infro.eu/downloads/studien/2\\_Holzwerkstoffindustrie%202015.pdf](http://infro.eu/downloads/studien/2_Holzwerkstoffindustrie%202015.pdf). Abruf: 16.06.2020.
- [Dön20] DÖNCH: *Lüftungsanlagen*. Bd. Handbuch Haustechnische Planung. Stuttgart und Zürich, Karl Krämer Verlag, 2000.
- [Eig16] EIGNER, S.: *TU Graz entwickelt umweltfreundlichen Ökobeton*. 2016. URL: <https://www.tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-news/einzelansicht/article/tu-graz-entwickelt-umweltfreundlichen-oekobeton/>.Abruf: 22.04.2020.
- [Els19] ELSNER, C.: *Unkontrollierter Chemiekalienmix. "Nicht nur erstickend"*. 2018. URL: <https://www.zdf.de/dokumentation/planet-e/planet-e-chemiecocktails-100.html>, Abruf: 01.01.2019.
- [EH17] EICKE-HENNING, W.: *Historischer Wärmeschutz: Geschichte der Dämmstoffe*. 2017. URL: <https://www.nei-dt.de/Downloads/Geschichte%20der%20Daemmstoffe-Eicke-Hennig-2017.pdf>. Abruf: 28.04.2020.
- [Els18] Elsner, H., *Sand - auch in Deutschland bald knapp?*, Commodity-Top News Nr 56, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover Feb. 2018
- [Fan70] FANGER: *Thermal Comfort. Analysis and applications in enviromental engineering*. Kopenhagen, Danish Technical Press,1970.
- [Fer17] FERTIG, A.: *Fugenlüftung funktioniert nicht*. 2017. URL: <http://docplayer.org/54617083-Ein-unternehmen-der-gruppe.html>, Abruf: 11.11.2018.
- [Fie95] FIEDLER, K.: *Hygiene/Präventivmedizin/Umweltmedizin systematisch*. UNI-MED Verlag AG, Lorch/ Württemberg, 1995.



- [Fie17] FIEDLER, K.: *Schadstoffe im Bauwesen – wie gefährdet ist der Mensch?* 2017. URL: <https://www.nachhaltigesbauen.de/veranstaltungen/nationale-veranstaltungen/bmvbs-symposium-gesund-und-umweltgerecht-bauen-die-richtige-baustoffwahl-mit-wecobis.html>, Abruf: 18.12.2018.
- [FNR19] FNR, KAISER, C., NIKLASCH, W., SCHÖPGENS, H. SPRITZENDORFER, J. TUSCHINSKI M.: *Marktübersicht- Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*. 10. Auflage, 2019. Broschüre. URL: [https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch\\_Daemmstoffe\\_2020\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Brosch_Daemmstoffe_2020_web.pdf). Abruf: 1.5.2020.
- [FG17] FRAUENHOFER-GESELLSCHAFT (Herausgeber): *Altholz- neues Leben als Sekundärrohstoff*. 2017. URL: [https://www.binderholz.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/pruefzeugnisse-zulassungen/EPD-binderholz-Brettschichtholz-BSH\\_28-11-2024.pdf](https://www.binderholz.com/fileadmin/user_upload/pdf/pruefzeugnisse-zulassungen/EPD-binderholz-Brettschichtholz-BSH_28-11-2024.pdf). Abruf: 10.05.2020.
- [Gla16] GLAHN: *Instationäre Raumluftrömung zur Komfortoptimierung – Simulationsstudie zur Bewertung der durch Deckenventilatoren erzeugten Raumluftrömung*. Fachbereich Bauingenieurwesen, Hochschule Ostwestfalen Lippe, Detmold, 2016.
- [Gie94] GIESE, M. ET. AL.: *etoxification of Formaldehyde by the Spider Plant. Plant Physiology, vol. 104*, American Society of Plant Biologists (ASPB), 4. Auflage, 1994.
- [GHS] GOERKE, M., HAGEMANN, H. und SCHULTE, A.: *Regionalcluster-Ostwestfalen-Lippe-Kurzprofile in deutscher und englischer Sprache*. o.J. nicht online verfügbar.
- [Gra16] GRAUBNER, W.: *Holzverbindungen. Gegenüberstellung japanischer und europäischer Lösungen*. Deutsche Verlagsanstalt, München, in der Verlagsgruppe Random House GmbH, 2. Auflage, 2016.
- [Gri19] GRIMM, R.: *Beton aus Wüstensand?* 2019. URL: <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/beton-aus-wuestensand-multicon-pellets-granulat-revolution-in-der-betonindustrie/>. Abruf: 22.04.2020.
- [Gri20] GRIMM, R.: *Was sind Polyurethanböden?* 2020. URL: [https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/boden\\_und\\_wand/was-sind-polyurethan-boeden/](https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/boden_und_wand/was-sind-polyurethan-boeden/). Abruf: 4.05.2020.
- [GSs14] GESAMTVERBAND SCHADSTOFFSANIERUNG: *Schadstoffe in Innenräumen und an Gebäuden. Erfassen, bewerten, beseitigen ; mit 79 Tabellen*. Müller (Bauen im Bestand), Köln, 2. Auflage, 1995.
- [Hab12] HABERER, M.: *1200 Garten- und Zimmerpflanzen*. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim), 2012.
- [Hah07] HAHN: *„Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie*. 2007. URL: [https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2007\\_009.pdf](https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2007_009.pdf), Abruf: 17.12.2018.
- [Hah16] HAHN, R.: *Beton für Klimaschutz*, 2016. URL: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/erde-klima/co2-speicherung-beton-fuer-den-klimaschutz-14546281.html>. Abruf: 09.05.2020.
- [Hee18] HEESEMANN ET AL.: *Geschichte*. 2018. URL: <http://www.mvp.uni-muenchen.de/institut/geschichte/>, Abruf: 02.11.2018.

- [Hei15] HEESEMANN ET AL.: *Gesund bauen und wohnen: Diese Gütesiegel helfen bei der Baustoff-Auswahl*. 2015. URL: <http://www.aktion-pro-eigenheim.de/haus/presse/PI-Gesund-bauen-und-wohnen-Diese-Guetesiegel-helfen-bei-der-Baustoff-Auswahl.php>, Abruf: 05.01.2019.
- [HLZA05] HOYT, T., LEE, K. H., ZHANG, H., ARENS, E., WEBSTER, T.: *Energy and Buildings 104 (Using footwarmers in officies for thermal comfort and energy savings)*. Center for the Built Environment, University of California, Elsevier, Berkeley, 2005.
- [HRRS18] HILLEBRANDT, A., RIEGLER-FLOORS, P., ROSEN, A. und SEGGEWIES, J.: *Atlas Recycling*. Detail Business Information GmbH, München, 1. Auflage, 2018.
- [HNSVW03] NATTERER, T., NATTERER, J., SCHWEIZER, R., VOLZ, M. und Winter, W.: *Holz-bau Atlas*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München, 4. Auflage, 2003.
- [Hoch20] HOCHPARTERRE AG (Herausgeber): *Digitales Holz*. Themenheft von Hochparterre AG, Zürich, 2020. URL: [https://issuu.com/hochparterre/docs/hochparterre\\_digitales\\_holz\\_2020?fr=sZGE5MzY5NTIONQ](https://issuu.com/hochparterre/docs/hochparterre_digitales_holz_2020?fr=sZGE5MzY5NTIONQ). Abruf: 10.05.2020.
- [Hor07] HORSCHING, J.: *Bauen mit Lehm – Renaissance eines traditionellen Baustoffs*. In: *db deutsche bauzeitung* (2017). URL: <https://www.db-bauzeitung.de/db-themen/technik/bauen-mit-lehm/>. Abruf: 16.04.2020.
- [Iba14] IBA (INDUSTRIEVERBAND BÜRO UND ARBEITSWELT E. V.): *Vorteile eines attraktiv gestalteten Arbeitsumfeldes*. 2014. URL: <https://iba.online/arbeitsplatz-buero/fachschriften/studie-green-lean/> 28.12.2018.
- [IBU21] Institut für Bauen und Umwelt (IBU) *Das epd-Programm*, Url: <https://ibu-epd.com/epd-programm>, letzter Zugriff 17.03.2021
- [IBU19] IBU (Herausgeber): *Umwelt-Produktdeklaration BSH*. 2019. URL: [https://www.binderholz.com/fileadmin/user\\_upload/pdf/pruefzeugnisse-zulassungen/EPD-binderholz-Brettschichtholz-BSH\\_28-11-2024.pdf](https://www.binderholz.com/fileadmin/user_upload/pdf/pruefzeugnisse-zulassungen/EPD-binderholz-Brettschichtholz-BSH_28-11-2024.pdf). Abruf: 10.05.2020.
- [Jam16] JAMNITZKY, J.: *Stahl-frei-Halle mit reiner Klebe-konstruktion zur Erprobung elektronischer Geräte der Bundeswehr*. 2016. URL: [https://www.forum-holzbau.com/pdf/40\\_IHF\\_2016\\_Jamnitzky.pdf](https://www.forum-holzbau.com/pdf/40_IHF_2016_Jamnitzky.pdf). Abruf: 10.05.2020.
- [Joc18] JOCKEL, T., a: *Innenraumschadstoffe –Vorkommen und Analytik*. 2018. URL: [http://www.hs-owl.de/fb1/uploads/media/Vorlesung\\_4\\_Innenraumschadstoffe.pdf](http://www.hs-owl.de/fb1/uploads/media/Vorlesung_4_Innenraumschadstoffe.pdf), Abruf: 17.12.2018.
- [Joc18] JOCKEL, T., b: *Schimmel im Innenraum! Ursache – Abhilfe – gesundheitliche Aspekte*. 2018. URL: [http://www.hs-owl.de/fb1/uploads/media/Vorlesung\\_4\\_Schimmelpilze.pdf](http://www.hs-owl.de/fb1/uploads/media/Vorlesung_4_Schimmelpilze.pdf), Abruf: 05.12.2018.
- [KBRA19] Kim, J., Bauman, F., Raftery, P., Arens, E., Zhang, H., Fierro, G., Andersen, M., Culler, D.: *Occupant comfort and behavior: High-resolution data from a 6-month field study of personal comfort systems with 37 real office workers*. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, Center for the Built Environment, University of California, Elsevier, Berkeley, 2019.
- [Kek11] KEK: *Sicherheitsdatenblatt, Kohlendioxid*. 2011. URL: [https://apolog.shg-kliniken.de/fileadmin/user\\_upload\\_apolog/Sicherheitsdatenblaetter/Kohlendioxid.pdf](https://apolog.shg-kliniken.de/fileadmin/user_upload_apolog/Sicherheitsdatenblaetter/Kohlendioxid.pdf), Abruf: 09.11.2018.

- [KKPB09] KIND-BARKAUSKAS, F; KAUHSEN, B; POLÓNYI und S; BRANDT, J: *Beton Atlas*. Entwerfen mit Stahlbeton im Hochbau. Birkhäuser, München, 3. Ausgabe, 2009.
- [Kün06] KÜNZEL: *Fensterlüftung und Raumklima*. Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen. Feuchteabgabe in Wohnungen. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2006.
- [Kön05] KÖNNEKER: *Vostok-Eisbohrkern zeigt Parallelen zu heutiger Zwischeneiszeit*. 2005. URL: <https://www.spektrum.de/news/vostok-eisbohrkern-zeigt-parallelen-zu-heutiger-zwischeneiszeit/783008>, Abruf: 06.12.2018.
- [Kre18] KREUZER, H.: *Wie viel Licht braucht meine Pflanze?* 2018. URL: <https://www.zimmerpflanzenlexikon.info/impressum>, Abruf: 30.11.2018.
- [Kra16] Krauss, H.-W. *CO<sub>2</sub>-reduzierte Betone*, TU Braunschweig, IBMB, 2016
- [KRV01] Kunststoffrohrverband e.V. *Das EPD-Projekt*, EDP für ein PE-Rohr zur Trinkwasserversorgung; Bonn 2001; letzter Zugriff: 17.03.2021
- [Lar91] LARCHER, W.: *Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt ; 77 Tabellen, 8 Boxen*. Ulmer (UTB für Wissenschaft, 8074), 5. Auflage, 1991.
- [LUE11] LÜCKMANN, R.: *Holzbau Konstruktionen. energieeffizient - nachhaltig - praxisgerecht*. WEKA MEDIA GmbH & Co. KG, Kissing, 2011.
- [LWL18] LANDSCHAFTSVERBAND WESTFALEN LIPPE (Herausgeber), *Auslobungsunterlage zum Neubau eines Empfangs- und Ausstellungsgebäudes*, Detmold 2018
- [Mar01] MARTIN, C. ET AL.: *Minimumgesetz*. 2001. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/geographie/minimumgesetz/5125>, Abruf: 03.12.2018.
- [Miß18] MISSFELDT, M.: *Lichtspektrum*. 2018. URL: <https://www.brillen-sehhilfen.de/optik/lichtspektrum.php>, Abruf: 25.11.2018.
- [MVLS16] MÜLLER, A., VOGEL, M., LANG, S. und SAUSER, F.: *Historische Holzverbindungen. Untersuchung des Trag- und Lastverformungsverhaltens von historischen Holzverbindungen und Erstellung eines Leitfadens für die Baupraxis*. Biel, 2016 URL: [http://www.stiftung-denkmalpflege.ch/files/2016-11-30-Bericht\\_HHV.pdf](http://www.stiftung-denkmalpflege.ch/files/2016-11-30-Bericht_HHV.pdf). Abruf: 10.05.2020.
- [MK17] MÜLLER, A. und KURKOWSKI, H.: *Potentialstudie zur Umsetzung eines Re-/Upcyclingkonzeptes im Gebiet der IRR GmbH - Schwerpunkt mineralische Baustoffe*, 2017. URL: [http://rheinisches-revier.de/media/red\\_endfassung\\_potenzialst\\_kwb\\_15-10-2017\\_01.pdf](http://rheinisches-revier.de/media/red_endfassung_potenzialst_kwb_15-10-2017_01.pdf). Abruf: 27.04.2020.
- [MLI17] MY-LAB-INTERNATIONAL: *Formaldehyd*. 2018. URL: <https://my-lab.com/schadstoffe/formaldehyd-2863/>, Abruf: 19.12.2018.
- [Nas89] NASA: *Clean Air Study. INTERIOR LANDSCAPE PLANTS FOR INDOOR AIR POLLUTION ABATEMENT*. Science and Technology Laboratory Stennis Space Center. USA – Mississippi, 1989.
- [New] NEWMAN, L.: *Gebäudebezogene Erkrankungen*. 2018. URL: <https://www.msmanuals.com/de-de/profi/lungenkrankheiten/umweltbedingte-lungenerkrankungen/geb%C3%A4udebezogene-erkrankungen>, Abruf: 05.11.2018.

- [NB06] NOLD, BOCHMANN: *Gesundheitsgefahren im Büro*. 2006. URL: [https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2006\\_059.pdf](https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2006_059.pdf), Abruf: 25.11.2018.
- [Pas15] PASUT ET AL.: *Energy-efficient comfort with a heated/cooled chair: results from human subject tests*. *Build-ing and Environment*, Vol. 84, pp. 10-21. 2015. URL: DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.10.026. <https://escholarship.org/uc/item/2tq3z4cw>, Abruf: 13.11.2020.
- [Pfl10] PFLANZENFORSCHUNG: *Wie Pflanzen schwitzen*. 2010. URL: <https://www.pflanzenforschung.de/de/journal/journalbeitrage/wie-pflanzen-schwitzen-mechanismus-zum-wassersparen-ent-848>, Abruf: 05.01.2019.
- [Pfla] PFLANZENFORSCHUNG, a: *Photosynthese*. URL: <https://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/photosynthese-285>, Abruf: 29.12.2018.
- [Pflb] PFLANZENFORSCHUNG, b: *Stoffaustausch*. URL: <https://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/photosynthese-285>, Abruf: 29.12.2018.
- [Pflc] PFLANZENFORSCHUNG, c: *Lichtreaktion*. URL: <https://www.pflanzenforschung.de/de/themen/lexikon/lichtreaktion-photosynthese-288>, Abruf: 20.12.2018.
- [Pol] POLYCARE (Herausgeber): *I Polymerbeton*. o.J. URL: <https://poly-care.de/index.php/de/polycare-de/polymerbeton>. Abruf: 22.04.2020.
- [Pop13] POPP, P.: *Steckverbindungen aus Holz: Bürogebäude in Zürich von Shigeru Ban*. 2013. URL: <https://www.detail.de/artikel/steckverbindungen-aus-holzbuerogebaeude-in-zuerich-von-shigeru-ban-10826/>. Abruf: 10.05.2020.
- [Pos18] POSSEL, R.: *Die Bedeutung von CO<sub>2</sub> in der Pflanzenzucht*. 2018. URL: <https://www.der-indoor-farmer.de/growguide/36-die-bedeutung-von-co2-f%C3%BCr-die-pflanzenzucht.html>, Abruf: 14.11.2018.
- [Rau15] RAUCH, M.: *Gebaute Erde Gestalten & Konstruieren mit Stampflehm*. Detail Verlag, 2015.
- [RW19] REESE, M. und WOEHLIN, S.: *Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm*. In: dbz, Regionales Bauen (2019). URL: [https://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Robotische\\_Fabrikation\\_von\\_Bauteilen\\_aus\\_Stampflehm\\_3390495.html](https://www.dbz.de/artikel/dbz_Robotische_Fabrikation_von_Bauteilen_aus_Stampflehm_3390495.html). Abruf: 16.04.2020.
- [Rei18] REINSPRECHT, S.: *Raumklima im Büro*. 2018. URL: <https://ergonomie-am-arbeitsplatz.de/raumklima-buero/>, Abruf: 16.12.2018.
- [Rud03] RUDOLPH, S.: *Sick Building Syndrome: Neue Erkenntnisse und Ihre Auswirkungen auf den Bau und Betrieb von RLT-Anlagen*. Diplomica Verlag GmbH, 2003.
- [Sau99] SAUERMOST, R. ET AL., a: *Etiement*. 1999. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/etiement/22746>, Abruf: 25.12.2018.
- [Sau99] SAUERMOST, R. ET AL., b: *Diffusion*. 1999. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/diffusion/18154>, Abruf: 01.01.2019.
- [Sau99] SAUERMOST, R. ET AL., c: *Pflanzenstress*. 1999. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/pflanzenstress/50712>, Abruf: 29.10.2018.
- [Sch19] SCHWARZ, M. (Wald und Holz NRW): *Holzwirtschaft in Südwestfalen*. Impulse zum Status Quo in der Region. 2019. nicht online verfügbar.

- [SDGB19] SCHWARZKOPP, F., DRESCHER, J., GORNING, M. und BLAZEJCZAK, J.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und -Erde-Industrie bis 20135 in Deutschland. 2019. URL: [https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user\\_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Rohstoffe/Rohstoffstudie\\_2019.pdf](https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Rohstoffe/Rohstoffstudie_2019.pdf). Abruf: 04.06.2020.
- [Sch06] SCHÖPPER, C.: *Entwicklung eines naturnahen Bindemittels aus nachwachsenden Rohstoffen auf Proteinbasis zur Herstellung von Mitteldichten Faserplatten*. Dissertation, 2006. URL: <https://ediss.uni-goettingen.de/bitstream/handle/11858/00-1735-0000-0006-B0F8-9/schoepper.pdf?sequence=1>. Abruf: 16.09.2020
- [Sch19] SCHROEDER, H.: *Lehmbau*. Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Springer Vieweg, 3. Auflage, 2019.
- [Sch09] SCHULTE, U.: *Zement- vom Klimasünder zum Klimaretter?*. In: DAZ Nr.26 (2009). URL: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2009/daz-26-2009/zement-vom-klimasuender-zum-klimaretter>. Abruf: 03.05.2020.
- [Sob13] SOBEK, W.: Den Gesetzten der Physik und dem Wohle der Menschen dienen. In: Deutsche Ingenieur Blatt, 7/8, 2013.
- [Sta18] STAEGER, T.: *Kohlendioxid*. 2018. URL: <https://wetter.tagesschau.de/wetterthema/2018/09/27/kohlendioxid.html>, Abruf: 19.11.2018.
- [Sta19] STATISTA: *Anteile der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Gebäude*. 2019. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167992/umfrage/anteil-der-co-emissionen-durch-gebaeude/>, Abruf: 04.01.2019.
- [Sta20] STATISTA: *Zementabsatz in Deutschland nach Sorte 2018-2019*, Url: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/281571/umfrage/zementabsatz-in-deutschland-nach-sort/>; Zugriff: 25.12.2020
- [Six20] SIX, A.: *Rezeptur für Ökobeton. 2020*. URL: <https://www.empa.ch/web/s604/a-recipe-for-eco-concrete>. Abruf: 22.04.2020.
- [SSG19] STEP SYSTEMS GmbH: *Lux-Wert-Tabelle*. 2019. URL: [www.stepsystems.de/files/lux\\_werttabelle.pdf](http://www.stepsystems.de/files/lux_werttabelle.pdf), Abruf: 20.11.2018.
- [Str17] STRAFF, W.: *Krank durch krankmachende Räume?* Umweltbundesamt. 2017. URL: <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/krank-durch-krankmachende-raeume-sick-building-syndrom-sbs-und-multiple-chemische-sensitivitaet-mcs.pdf>, Abruf: 29.11.2018.
- [Tap] TAPPLER, P.: *Innenraumluft-Info - Innenluftqualität und Gesundheit*. URL: <http://raumluft.linux47.webhome.at/gesunde-raumluft/>, Abruf: 21.12.2018.
- [TGC18] THE GREEN CHANNEL: *Wie funktioniert ein Blatt*. 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=mHwYn-DKo4wQ&list=PLt9FDpLrO8vmxFTcpNy6V1yiqjmXwWqG>, Abruf: 01.12.2018.
- [TUD] TUD INSTITUT FÜR MASSIVBAU (Herausgeber): *Mineralische und ökologische Baustoffe*. o.J. URL: [https://www.massivbau.tu-darmstadt.de/forschung\\_fgm/forschungsgebiete\\_fgm/oekobeton\\_fgm/index.de.jsp](https://www.massivbau.tu-darmstadt.de/forschung_fgm/forschungsgebiete_fgm/oekobeton_fgm/index.de.jsp). Abruf: 22.04.2020.
- [TUM] TUM, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Univ. -Prof. Dr. -Ing. Stefan Winter (Herausgeber): *Hybride Holzbauteile aus Laubholz-Furnieren und Brettschichtholz*

aus Nadelholz –Holzbewehrtes Holz. o.J. URL: [https://www.bgu.tum.de/fileadmin/w00blj/hb/04\\_Forschung/01\\_Laufende\\_Forschungsprojekte/02\\_Kurzbeschreibungen/KB\\_HBH.pdf](https://www.bgu.tum.de/fileadmin/w00blj/hb/04_Forschung/01_Laufende_Forschungsprojekte/02_Kurzbeschreibungen/KB_HBH.pdf). Abruf: 10.05.2020.

- [Uwb15] UMWELTBUNDESAMT, (Herausgeber) a: *PCP*. 2015. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/tags/pcp>, Abruf: 21.12.2018.
- [Uwb16] UMWELTBUNDESAMT, (Herausgeber) b: *Innenraumluf*t. 2016. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluf>t, Abruf: 01.12.2018.
- [Uwb15] UMWELTBUNDESAMT, (Herausgeber) c: *Dioxine und Polychlorierte Biphenyle (PCB) in der Umwelt*. 2015. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien/dioxine-polychlorierte-biphenyle-pcb-in-der-umwelt#textpart-1>, Abruf: 15.12.2018.
- [Uwb19] UMWELT BUNDESAMT (Herausgeber) d: *Abfallaufkommen*. 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#bauabbruch-gewerbe-und-bergbauabfalle>. Abruf: 04.06.2020.
- [Umw16] UMWELTBUNDESAMT (Herausgeber): *Bauabfälle*, 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#mineralische-bauabfalle>. Abruf: 16.04.2020.
- [VDZ19] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. (Herausgeber): *Umwelt-Produktdeklaration*. Zement, 2017. URL: <https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/VDZ-EPD-2017.pdf>. Abruf: 22.04.2019.
- [Vog11] VOGEL, S., OTT, D. und Dressel, D.: *Neue Technologien in der Zementproduktion zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission*. 2011. Weimar, Jena. URL: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27006.pdf>. Abruf am: 23.04.2020.
- [Wan18] WANG, Z.: *Building and Environment 138*. Center for the Built Environment, University of California, Berkeley, 2018.
- [WCD98] Watson, R.D., Chapman, K.S., DeGreef, J.M.: *Case study: seven-system analysis of thermal comfort and energy use for a fast-acting radiant heating system*. T ASHRAE 104 (1), San Francisco, 1998.
- [Wald14] WALD UND HOLZ NRW (Herausgeber): *Die Wälder Nordrhein-Westfalens im Blick. Ergebnisse der landesweiten Waldinventur*. 2014. 2014. URL: [https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Presse/Dokumente/Broschuere\\_WuH\\_Landeswaldinventur-2014.pdf](https://www.wald-und-holz.nrw.de/fileadmin/Presse/Dokumente/Broschuere_WuH_Landeswaldinventur-2014.pdf). Abruf: 12.06.2020.
- [WIN] WIN (Herausgeber): *WIN, Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V.* o.J. URL: <https://www.beton.org/organisation/unternehmenfoerderpartner/win/>. Abruf am: 23.04.2020
- [DHZ20] WÖRRLE, J.-T., *Bauboom- Kies und- Sand werden knapp*, Deutsche Handwerkszeitung, Url: <https://www.deutsche-handwerks-zeitung.de/bauboom-kies-und-sand-werden-knapp/150/3094/364797>

- [Wuf20] WUFI'S PERFORMANCE AND LIMITATIONS: Limitations of the Mathematical Model. 2020. URL: [https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Discussion:WUFI-Pro\\_PerformanceandLimitations](https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Discussion:WUFI-Pro_PerformanceandLimitations). Abruf: 27.01.2020.
- [WWF19] WWF (Herausgeber): *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie, Hintergrund und Handlungsoption*, Februar 2019. URL: [https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF\\_Klimaschutz\\_in\\_der\\_Beton-\\_und\\_Zementindustrie\\_WEB.pdf](https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf). Abruf: 22.04.2020.
- [WWF18] World Wide Fund For Nature (WWF): *Die schwindenden Wälder der Welt*, Eigenverlag WWF, Berlin, 2018
- [ZAKB09] ZHANG, H., ARENS, E., KIM, D., BUCHBERGER, E., BAUMAN, F., HUIZENGA, C.: *Comfort, Perceived Air Quality, and Work Performance in a Low-Power Task-Ambient Conditioning System*. Center for the Built Environment, University of California, Berkeley, 2009.
- [ZAZ15] ZHANG, H., ARENS, E., ZHAI, Y.: *A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments. Building and Environment*. 2020. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.013> <http://www.escholarship.org/uc/item/4kv4f2mk>. Abruf: 13.11.2020.
- [ZZZP13] ZHAI, Y., ZHANG, H., ZHANG, Y., PASUT, W., ARENS, E., MENG, Q.: *Comfort under personally controlled air movement in warm and humid environments*. Center for the Built Environment, University of California, Berkeley, Wushan, 2013.

#### Normative Regelwerke

ASHRAE Handbook - HVAC Applications (SI), 2019

ASR A3.5, Technische Regeln für Arbeitsstätten – Raumtemperatur, Juni 2010.

ASR A3.6, Technische Regeln für Arbeitsstätten – Lüftung, Januar 2012.

DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung), Information 215-410, Bildschirm- und Büroarbeitsplätze. Leitfaden für die Gestaltung, September 2015.

DIN 206-1 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth-Verlag, Berlin 2017

DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton - Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth-Verlag, Berlin 2008

DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Februar 2013

DIN 4109-1: Schallschutz im Hochbau; Teil 1 Anforderungen, Beuth- Verlag Berlin 2018

DIN 4109 Beiblatt 2: Anforderungen an den erhöhten Schallschutz, Beuth- Verlag Berlin, 1986

DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage; Deutsche Fassung EN 13779, September 2007.

DIN 13829: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, Februar 2001.

DIN EN ISO 14040 - Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Beuth Verlag, Berlin 2020

DIN EN 15251: Eingangsparmeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, August 2007.

DIN EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen– Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“. Beuth-Verlag, Berlin 2020

DIN 16798-1: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; – Module M1-6, Juli 2015

Technische Regeln für Gefahrenstoffe – Arbeitsplatzgrenzwerte, Januar 2006.

Marktdaten der Deutschen Säge- und Holzindustrie (DeSH) von 2018



# Anhang

## Abbildungsverzeichnis A1

Abbildung A1.1: Grundtypen zimmermannsmäßige Holzverbindung.....	106
Abbildung A1.2: Handwerkliche Holzbearbeitung.....	107
Abbildung A1.3: Längsverbindung .....	110
Abbildung A1.4: Leimfreies Fertigteil als Wand- oder Deckenelement, Holcius .....	113
Abbildung A1.5: Keilzinkverbindung .....	115
Abbildung A1.6: Dübelholzplatte .....	115
Abbildung A1.7: Holz100, einstoffliche Massivholzwand mit Holzdübel <i>Gedübelte Brettstapel (Wand- und Deckenelemente)</i> .....	116
Abbildung A1.8: Stahlverbindung .....	117
Abbildung A1.9: Buchenholzschraube.....	118
Abbildung A1.10: Vergleich der typischen Tragfähigkeiten von Holz-Holz-Verbindungen.....	118
Abbildung A1.11: Zapfenstoß.....	119
Abbildung A1.12: Holz-Skelettbau Tamedia Headquarter .....	120
Abbildung A1.13: Holz-Holzverbindung Tamedia Headquarter.....	120
Abbildung A1.14: Vorfertigung des Holztragwerks, Finanzparken in Stavanger .....	121
Abbildung A1.15: Hartholzdübel-Verbindung, Finanzparken in Stavanger .....	121
Abbildung A1.16: L-IED Halle, H13 Ingenieure .....	122
Abbildung A1.17: Holzbearbeitung durch computergesteuerte Roboter .....	123
Abbildung A1.18: Swatch und Omega Headquarter, Shigeru Ban.....	124
Abbildung A1.19: Holz100, Roboter bei Herstellung von einstofflicher Massivholzwand .....	125
Abbildung A1.20: Waldgebiete um Detmold. Grafik: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main .....	128
Abbildung A1.21: Beschäftigtenzahlen in der Baubranche im Jahr 2011.....	129
Abbildung A1.22: Produktionsstandorte der Holzwerkstoffindustrie.....	130
Abbildung A1.23: Produktionsstandorte der Holzwerkstoffindustrie in den Jahren 2010 und 2015 .....	131
Abbildung A1.24: Opus caementicium, Pantheon (128 n. Chr.), Rom .....	134
Abbildung A1.25: Schalungsstruktur in Sichtbeton .....	138
Abbildung A1.26: Hohlkörper in Betondecke .....	141
Abbildung A1.27: Manuelle Herstellung Stampflehmwand. ....	149
Abbildung A1.28: Vorgefertigte Stampflehmblöcke .....	153
Abbildung A1.29: Baustelle Kapelle der Versöhnung .....	154
Abbildung A1.30: Innenraum der Kapelle der Versöhnung.....	154

Abbildung A1.31: Ansicht Gemeindezentrum Karlsruhe .....	155
Abbildung A1.32: Tragende Stampflehmwand im Gemeindezentrum Karlsruhe .....	155
Abbildung A1.33: Ansicht Vorarlberg Museum in Bregenz .....	156
Abbildung A1.34: Ausstellungsraum mit Lehmputz .....	156
Abbildung A1.35: Nachbau einer gedämmten Wand aus der Bronzezeit .....	159
Abbildung A1.36: Zelluloseflocken aus Altpapier.....	161
Abbildung A1.37: Getreidefeld .....	162
Abbildung A1.38: Jutesäcke.....	163
Abbildung A1.39: Flachsfasern .....	163
Abbildung A1.40: Holzweichfaserplatte .....	165
Abbildung A1.41: Jutedämmung Foto: Thermo Natur .....	166
Abbildung A1.42: Einblasdämmung aus Holzspänen .....	166
Abbildung A1.43: Holzschalung .....	168
Abbildung A1.44: Mehrschichtholzplatte .....	169
Abbildung A1.45: ESB-Platte .....	171
Abbildung A1.46: Strohbauplatte.....	172
Abbildung A1.47: Lehmbauplatte .....	173
Abbildung A1.48: Stirnholzpflaster .....	175
Abbildung A1.49: Stampflehmboden.....	176
Abbildung A1.50: Natursteinplatten.....	177

## **Abbildungsverzeichnis A2**

Abbildung A2.1: Jahresübersicht der relative Feuchte Außenluft (Kassel Testreferenzjahr 2004)	179
Abbildung A2.2: Jahresübersicht der Temperatur der Außenluft (Kassel Testreferenzjahr 2004)	179
Abbildung A2.3: Außenansicht mit Raumordnung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus.....	180
Abbildung A2.4: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen.....	181
Abbildung A2.5: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen.....	181
Abbildung A2.6: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen .....	182
Abbildung A2.7: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen.....	183
Abbildung A2.8: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedlichen Trennwandkonstruktionen .....	183

Abbildung A2.9: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für unterschiedlichen Trennwandkonstruktionen .....	184
Abbildung A2.10: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken.....	185
Abbildung A2.11: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmstärken .....	186
Abbildung A2.12: Jahresübersicht der resultierenden Absoluten Luftfeuchte im Innenraum variiertes Stampflehmwandstärken .....	186
Abbildung A2.13: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken .....	187
Abbildung A2.14: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken .....	187
Abbildung A2.15: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden absoluten Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken .....	188
Abbildung A2.16: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken.....	188
Abbildung A2.17: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken.....	189
Abbildung A2.18: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden absoluten Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken.....	189
Abbildung A2.19: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen.....	191
Abbildung A2.20: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen.....	191
Abbildung A2.21: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen .....	192
Abbildung A2.22: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.07. über die Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen .....	192
Abbildung A2.23: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.07. der resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen .....	193
Abbildung A2.24: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen .....	193
Abbildung A2.25: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen.....	194
Abbildung A2.26: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien.....	195
Abbildung A2.27: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien .....	195
Abbildung A2.28: Zwei Tagesübersicht vom 01.02. bis zum 02.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien.....	196

Abbildung A2.29: Zwei Tagesübersicht vom 01.02. bis zum 02.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien .....	196
Abbildung A2.30: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien.....	197
Abbildung A2.31: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien .....	198
Abbildung A2.32: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.0. über die Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien .....	198
Abbildung A2.33: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.07. der resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit im Innenraum unterschiedlicher Materialien .....	198
Abbildung A2.34: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien.....	199
Abbildung A2.35: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien.....	199
Abbildung A2.36: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen .....	200
Abbildung A2.37: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen .....	201
Abbildung A2.38: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen.....	201
Abbildung A2.39: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen.....	202
Abbildung A2.40: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen.....	202
Abbildung A2.41: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen .....	203
Abbildung A2.42: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedliche Luftwechselraten.....	204
Abbildung A2.43: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten.....	204
Abbildung A2.44: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten .....	205
Abbildung A2.45: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten.....	205
Abbildung A2.46: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten .....	206
Abbildung A2.47: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten .....	206
Abbildung A2.48: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus ohne Vorzone (Ausstellung (1) mit großer Verglasung).....	207

Abbildung A2.49: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Ausstellungsraum mit und ohne Vorzone .....	208
Abbildung A2.50: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum mit und ohne Vorzone .....	208
Abbildung A2.51: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit und ohne Vorzone .....	209
Abbildung A2.52: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit und ohne Vorzone .....	209
Abbildung A2.53: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit und ohne Vorzone .....	210
Abbildung A2.54: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit und ohne Vorzone .....	210
Abbildung A2.55: Abstraktionsmodell und Modellannahme - Aufbau und Raster des Grundmodells .....	213
Abbildung A2.56: Piktogramm der simulierten Dämmmaßnahmen .....	213
Abbildung A2.57: Temperaturen in Innenraummitte (oben und unten – Mittelwert) und Erdreich (in 0.30 m Tiefe Gebäudemitte) für verschiedene Gründungstiefen .....	215
Abbildung A2.58: Temperaturen in Innenraummitte (oben und unten – Mittelwert) und Erdreich (in 0.30 m Tiefe Gebäudemitte) für verschiedene Dämmmaßnahmen .....	216
Abbildung A2.59: Behaglichkeitsbereich im Büro .....	219
Abbildung A2.60: Querschnitt eines Blattes (DAVENPORT 2015) .....	228
Abbildung A2.61: CO <sub>2</sub> -Fixierate einzelner Zimmerpflanzen während der Tag-Periode .....	238
Abbildung A2.62: zeigt die CO <sub>2</sub> -Abbauraten bzw. Abgaberaten während der Nacht-Periode. ....	239
Abbildung A2.63: Grundriss des Büroraumes .....	243
Abbildung A2.64: Vergleich beider Messreihen über einen Zeitraum von 48 Stunden .....	244
Abbildung A2.65: Die Büroräume im 2. OG des geplanten Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des Detmolder Freilichtmuseums. ....	247
Abbildung A2.66: Jahresübersicht über die resultierenden Lufttemperaturen für verschiedene Innenraumbegrünungen. ....	248
Abbildung A2.67: Jahresübersicht über die resultierenden relativen Luftfeuchten für verschiedene Innenraumbegrünungen. ....	248
Abbildung A2.68: Wochenübersicht vom 13.07. bis zum 21.07. über die resultierenden Lufttemperaturen für verschiedene Innenraumbegrünungen .....	249
Abbildung A2.69: Wochenübersicht vom 13.07. bis zum 21.07. über die resultierenden relativen Luftfeuchten für verschiedene Innenraumbegrünungen .....	249
Abbildung A2.70: Wochenübersicht vom 13.07.2020 bis zum 21.07.2020 über die resultierenden (Innenraum-)Temperaturen bei Innenraumbegrünung .....	250
Abbildung A2.71: Wochenübersicht vom 13.07.2020 bis zum 21.07.2020 über die resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit bei Innenraumbegrünung .....	251

## Abbildungsverzeichnis A3

Abbildung A3.1: Anzeige modularer Informationen für die verschiedenen Lebenszyklusstadien des Gebäudes nach EN 15804:2012.....	253
Abbildung A3.2: Ausschnitt aus der Internetseite ÖKOBAUDAT; Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019) .....	254
Abbildung A3.3: Beispiel einer Umwelt-Produktdeklaration (EPD) von Konstruktionsvollholz ....	255
Abbildung A3.4: Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach (BIBH, 2017)....	256
Abbildung A3.5: Transportbeispiel Fahrmischer für Ortbeton .....	258
Abbildung A3.6: Waldbilanz zwischen 2005-2010 – neuere Daten existieren, sind aber wenig besser, .....	259
Abbildung A3.7: bisheriger Kreislauf eines Holzwerkstoffes und zukünftig mit eigenen Ergänzungen (in grün) .....	260
Abbildung A3.8: <i>Vergleich unterschiedlicher Holzwerkstoffe in Bezug auf PE n.e.</i> .....	261
Abbildung A3.9: Vergleich unterschiedlicher Holzwerkstoffe in Bezug auf GWP .....	262
Abbildung A3.10: Kalkabbau zur Zementherstellung bei Erwitte .....	263
Abbildung A3.11: Zementklinker nach dem Brennen.....	263
Abbildung A3.12: Marktanteile verschiedener Zementsorten (in 1000 Tonnen) (Statista, 2020) .	263
Abbildung A3.13: Verbreitung von Bausand und Kies in Deutschland nach (Diel, 2007) .....	264
Abbildung A3.14: Kreislauf eines Betonwerkstoffes .....	265
Abbildung A3.15: Aufteilung der klimarelevanten Emissionen (GWP) für einen Kubikmeter Standardbeton C25/30 .....	266
Abbildung A3.16: Vergleichende GWP- Betrachtung am Beispiel von 1 m <sup>3</sup> Stahlbeton.....	267
Abbildung A3.17: Lebenszyklus von Bauwerken aus Lehmbaustoffen .....	268
Abbildung A3.18: Wirkbilanzen für verschiedene Lehmbaustoffe nach Ökobau.dat .....	269
Abbildung A3.19: Lehmvorkommen in Deutschland nach .....	270
Abbildung A3.20: verschiedene Dämmstoffe im Überblick [Bilder überwiegend vom FIW,Dr. Andreas Holm].....	271
Abbildung A3.21: Marktanteile von Naturdämmstoffen nach Angaben der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.....	272
Abbildung A3.22: Vergleich der nichterneuerbaren Primärenergie mineralischer (gelb), fossiler (blau), künstlicher (orange) und biotischer (grün) Dämmstoffe.....	273
Abbildung A3.23: Vergleich der erneuerbaren Primärenergie mineralischer (gelb), fossiler (blau), künstlicher (orange) und biotischer (grün) Dämmstoffe .....	273
Abbildung A3.24: Vergleich des CO <sub>2</sub> Äquivalents mineralischer (gelb), fossiler (blau), künstlicher (orange) und biotischer (grün) Dämmstoffe .....	274
Abbildung A3.25: Vergleich der Ökobilanzdaten für nachwachsende Dämmstoffe.....	276

Abbildung A3.26: Vergleich vom Treibhauspotential Bodenbelägen .....	277
Abbildung A3.27: Hirnholzparkett .....	277
Abbildung A3.28: Industriestabparkett .....	277
Abbildung A3.29: Ökologische Vergleich Plattenwerkstoffe .....	279
Abbildung A3.30: Ökologischer Vergleich von Innenputzen .....	281
Abbildung A3.31: Systemskizze einfacher Fachwerkträger .....	292
Abbildung A3.32: Systemskizzen Trägerrost.....	292
Abbildung A3.33: Kassettendecke aus Beton als vorgefertigte Schalung (links) und fertiges Bauteil (rechts) in einem Altenheim in Arbon, Singer Baenzinger Architekten, 2019 (Morris Breunig, 2020).....	295
Abbildung A3.34: Vorläufige Gesamtbilanz des Gebäudes .....	305

## **Tabellenverzeichnis A2**

Tabelle A2.1: Umsatz und Entzugsdauer von "Lebensmitteln" (TAPPLER, o.J.).....	217
Tabelle A2.2: Zusammenstellung der gemessenen tagesdurchschnittlichen Feuchteabgabe von Zimmerpflanzen (Bischof et al. 2006; 109). .....	218
Tabelle A2.3: Lufttemperatur in Arbeitsräumen (ASR A3.5 2010; 4) .....	218
Tabelle A2.4: Zulässige CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in Innenräumen.....	219
Tabelle A2.5: CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Raumlufte (ASR 3.6 2012; 4) .....	220
Tabelle A2.6: Übersicht der wichtigsten Innenraumschadstoffe (GESAMTVERBAND SCHADSTOFFSANIERUNG 2014; 535 ff.) .....	222
Tabelle A2.7: Mögliche Expositionen und Schadstoffquellen an Büroarbeitsplätzen (NOLD & BOCHMANN 2006; 200).....	224
Tabelle A2.8: Standardauslegungswerte für die CO <sub>2</sub> -Konzentration oberhalb der Konzentration in Außenluft unter Annahme einer Standard-CO <sub>2</sub> -Emission von 20 l/(h je Person) (DIN 16798-1; 51).....	225
Tabelle A2.9: Auslegungs-Lüftungsdaten zur Verdünnung von Emissionen in unterschiedlichen Gebäuden (DIN 16798-1; 49) .....	225
Tabelle A2.10: Mindestöffnungsfläche für kontinuierliche Lüftung und für Stoßlüftung (ASR 3.6 2012; 8).....	226
Tabelle A2.11: Pflanzenwachstum in Abhängigkeit von der Lichtintensität(vgl. Step Systems GmbH 2005; 1).....	230
Tabelle A2.12: Beispiele für den Lichtbedarf von Zimmerpflanzen (vgl. Step Systems GmbH 2005; 2 f.).....	230
Tabelle A2.13: Untersuchungen zur Entfernung von Ammoniak, Xylol und Toluol aus der Luft durch Zimmerpflanzen (Wolverton & Wolverton 1993; 13 f.).....	233
Tabelle A2.14 Liste luftreinigender Pflanzen .....	235
Tabelle A2.15: Ergebnisse der Messungen von unterschiedlichen Zimmerpflanzen (- als Vorzeichen: CO <sub>2</sub> -Assimilation, + als Vorzeichen: CO <sub>2</sub> -Abgabe) .....	240

## **Tabellenverzeichnis A3**

Tabelle A3.1: Zusammenstellung Wirkbilanz der Sohlplatte.....	283
Tabelle A3. 2: Ökologischer Vergleich Erdberührte Stützwand .....	288
Tabelle A3.3: Ökologischer Vergleich Hauptfassade.....	290
Tabelle A3.4: Ökologischer Vergleich Dachkonstruktion .....	294
Tabelle A3.5: Ökologischer Vergleich begehbare Decke.....	296
Tabelle A3.6: Ökologischer Vergleich Holzdecken .....	298
Tabelle A3.7: Ökologischer Vergleich tragende Innenwände .....	300
Tabelle A3.8: Ökologischer Vergleich nicht tragende Innenwände.....	302
Tabelle A3.9: Gegenüberstellung der für die Gebäudebilanz verwendeten Bauweisen.....	304



## – Anhang A1 –

### Arbeitsgruppe 1 Architektur, Ressourcenschonung

## 1 Primärkonstruktion-Rohbau

### 1.1 Holz

#### 1.1.1 Einleitung

Holz ist ein Jahrtausende alter Baustoff. Schon in der Steinzeit errichteten unsere Vorfahren Pfahlbauten aus Holz. Griechen, Römer und Ägypter nutzten es, soweit vorhanden, für Deckentragwerke (auch schon in mehrgeschossigen Gebäuden) und bis heute existieren in Europa Holzgebäude aus dem 12. Jahrhundert. In Deutschland prägen vieler Orts historische und traditionsbehaftete Fachwerkbauten das Erscheinungsbild des urbanen und ländlichen Raums. Nicht zuletzt durch die industrielle Revolution, eine landesweite Holznot, neue Anforderungen an Brand- und Schallschutz und die rasante Entwicklung von Stahl, Beton (vgl. Kap. 1.2.2) und künstlich hergestellten Steinen ab etwa 1850 wurde der Holzbau durch die neuen Bauweisen verdrängt, galt als provinziell, minderwertig und mit Nachteilen behaftet. Maßgebend für die Rückkehr zum Holz, insbesondere im industriellen Maßstab, war neben der Entwicklung neuartiger Holzprodukte (Leimholz), ausgehend vom Anfang des 20. Jahrhunderts, die Einführung von computergestützten Fertigungsmethoden (CNC), die den Holzbau aufgrund der hohen Präzision und Qualität in der Vorfertigung wieder wirtschaftlich und konkurrenzfähig machen. Seit den 1990er Jahren gewinnt der Holzbau zudem unter den Gesichtspunkten von Ökologie, Ökonomie und energieeffizienten Bauen wieder zunehmend an Bedeutung. Angesichts der global drängenden Fragen bietet Holz aus heutiger Sicht viele Vorteile:

- Bindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre als nachwachsender Rohstoff
- Holz entstammt der saubersten und menschenfreundlichsten Fabrik der Welt: dem Wald
- niedriger Energieaufwand zur Herstellung und Aufbereitung
- gute Verfügbarkeit bei nachhaltiger Forstwirtschaft
- kurze Transportwege bei heimischen Hölzern

Längst wurden diese ökologischen Vorteile gepaart mit vielfältigen konstruktiven Anwendungsmöglichkeiten von modernen Holzprodukten im Kontext von Großbauten seitens der Planer und Architekten erkannt. Daher findet der Ingenieurholzbau zunehmend in anspruchsvollen und großmaßstäblichen Bauaufgaben, wie Hallenbauten, mehrgeschossigen Wohn- und Bürogebäuden und Hochhäusern Anwendung. Um diesen komplexen und anspruchsvollen Bauaufgaben gerecht zu werden, wird das Naturprodukt in hoch spezialisierten holzverarbeitenden Betrieben zu einem Hochleistungsbaustoff veredelt. Diese Verarbeitungsprozesse sind im Vergleich zur traditionellen Wertschöpfungskette von Holz deutlich aufwendiger und gehen mit prozess- und transportbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen einher, welche die positive Ökobilanz des Baustoffs zu einem gewissen Grad schmälern. Darüber hinaus setzt der konventionelle Ingenieurholzbau den Einsatz von energieintensiven (erdölbasierten) Leim- und Stahlverbindungen voraus. Der folgende Text soll einen Überblick darüber verschaffen, inwiefern der traditionelle Holzbau, eine Rückbesinnung auf leimfreie Holzprodukte und zimmermannsmäßige Holzverbindungen, auf den modernen Hochbau im Museumskontext unter Einsatz digitaler Planungs- und Fertigungsverfahren übertragbar ist.

#### 1.1.2 Historischer Überblick

Der traditionelle Holzbau zeichnet sich durch den ausschließlichen Einsatz von Vollholz aus, welches als stabförmiges Tragwerkelement in unterschiedlichen statischen Systemen zusammengesetzt wird. Diese reichen vom massiven Holzblockbau über stabförmige Elemente wie eingespannt

Pfähle, ausgesteifte Rahmen bis hin zu komplexen Dachstühlen und Fachwerken. Diese Konstruktionen wurden stets zimmermannsmäßig hergestellt. Es wurden also handwerklich Verbindungspunkte durch folgende (beispielhafte) Füge-techniken ausgebildet:

- 1 Druckanschlüsse (z.B. Auflager, Verkämmungen, etc.)
- 2 Versatz (z.B. Sparren auf Pfette)
- 3 Zapfen (z.B. Durchsteckzapfen)
- 4 Verblattung (z.B. für Kreuzverbindungen)
- 5 Holznägel (z.B. Stift, Keile, Dübel, etc.)

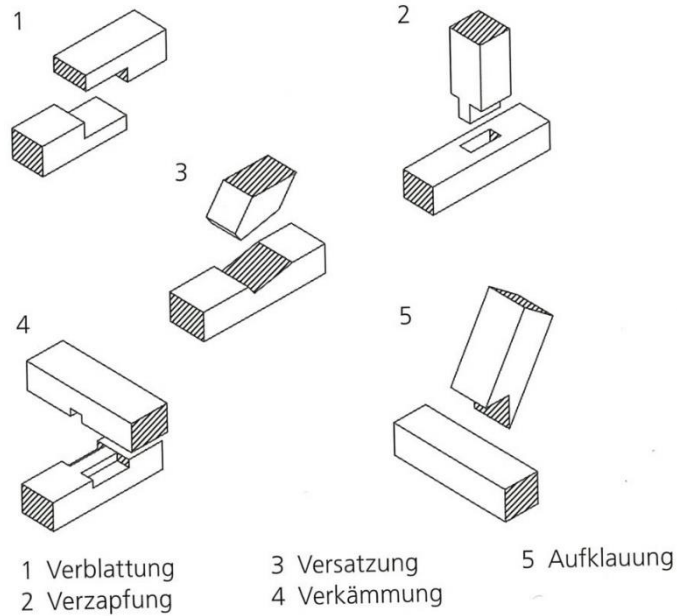


Abbildung A1.1: Grundtypen zimmermannsmäßige Holzverbindung [Lückmann, 2011: 34]



Abbildung A1.2: Handwerkliche Holzbearbeitung  
[Holz und Leim]

Seit dem Mittelalter sind vereinzelt auch geschmiedete Eisenteile (z.B. Eisennägel, Laschen, Klammern und Hängeeisen) im Holzbau verwendet worden, jedoch blieben sie aufgrund des hohen Herstellungsaufwands lange die Ausnahme.

Dieser naturbelassene, am Material orientierte Einsatz von Bauholz hat den Vorteil, dass Planungs- und Bearbeitungsschritte vor der Errichtung des Bauwerkes und somit auch Transportwege, Personal und Energie eingespart werden. Es besteht, je nach Verbindungsart, eine gute Lösbarkeit und in Abhängigkeit der Holzqualität ein hohes Potenzial der Wiederverwendbarkeit der Bauteile. Es ist ökologisch und ökonomisch sinnvoll, den Rohstoff Holz zunächst so unverarbeitet wie möglich einzusetzen, um eine Kaskadennutzung zu ermöglichen, die Ressourcen schont und die Wertschöpfung steigert.

In Anbetracht der ökologischen Vorteile des traditionellen Holzbaus stellt sich nun die Frage, ob sich dieser auf den modernen Hochbau als Primärtragwerk von Großbauten übertragen lässt.

Moderne Museumsbauten und insbesondere großmaßstäbliche Bauaufgaben stellen erhöhte Anforderungen an die Baukonstruktion. Es sind große Spannweiten gefragt, eine hohe Belastbarkeit und Steifigkeit, optimierte bauphysikalische Eigenschaften, konstruktiver Brandschutz und vieles mehr. Der traditionelle Holzbau stößt hier zunächst an einige Grenzen.

Das primäre Problem stellt die maximale Spannweite und Belastbarkeit dar. Diese hängen einerseits von der Länge und dem Querschnitt des Bauteils ab, andererseits von seiner Qualität (Festigkeit, Homogenität). Konstruktionsvollholz ist in seinen Dimensionen durch den natürlichen Baumwuchs begrenzt und weist außerdem natürliche Unregelmäßigkeiten auf, die die Belastbarkeit beeinträchtigen. Ein Vollholzträger kann daher nur für Spannweiten bis zu ca. 6m eingesetzt werden.

Auch der traditionelle Holzbau stand bereits vor diesem Problem und bietet verschiedene Lösungsansätze an. So wurden schon im Mittelalter Träger gestoßen, aufgedoppelt oder punktuell verstärkt. Außerdem wurden anspruchsvolle Raumtragwerke hergestellt, deren statische Höhe durch gezielte Lastführung bei geringen Stabquerschnitten erhöht werden. Auch vorgespannte und kraftschlüssig verzahnte Balken tauchen bereits im römischen Brückenbau auf. Jede dieser Methoden diente zur Maximierung der Spannweiten und Lastabtragungen.

Dennoch wurde der Baustoff Holz in Mitteleuropa spätestens durch die Industrialisierung von Stahl, Beton und Kunststein verdrängt. Diese neuen Werkstoffe boten praktisch grenzenlose Möglichkeiten in ihrer Gestaltung, waren sehr belastbar und widerstandsfähiger gegen Witterung. Holz dagegen war zu dieser Zeit zum einen im Vorkommen begrenzt und zum anderen mit Einschränkungen verbunden. Auch die Brennbarkeit stand der Erfolgsgeschichte des Holzbaus entgegen, nachdem im späten Mittelalter mehrere Stadtbrände dem Baustoff zu einem gefährlichen Ruf verhalfen. Außerdem wurden die bauphysikalischen Vorteile der Massivbauweise als thermische Speichermasse geschätzt, welche zu einem gleichmäßigerem Raumklima verhelfen und im Vergleich zur Fachwerkwand den Wärmeschutz geringfügig erhöhen konnte.

Holz wird nun fast ausschließlich in Ergänzung zu massiven Konstruktionen verwendet, beispielsweise als Dachstuhl. Die metallverarbeitende Industrie brachte im Verlauf des 19. Jahrhunderts reihenweise neue Befestigungstechnik auf den Markt, sodass die Montage von Holzbauteilen immer einfacher und die Fügepunkte belastbarer wurden. Die Einsatzmöglichkeiten von Holzbauteilen werden zunächst also durch eine Optimierung der Fügetechnik erweitert. Darüber hinaus wurde der Holzbau kostengünstiger, da die einfache Montage durch weniger geschulte Bauarbeiter ausgeführt werden konnte.

Der nächste Schritt in der Geschichte des Holzbaus ist die Entwicklung diverser verleimter Vollholzprodukte und Holzwerkstoffe zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Hierbei wird die Qualität des Bauteils nicht mehr der Natur überlassen, sondern exakt geplant. Bei Vollholzprodukten werden gezielt ausgewählte, leistungsfähige Hölzer miteinander verleimt, um somit flexible Querschnitte mit hoher Homogenität und optimiertem Kraftfluss herzustellen. Durch hochleistungsfähige Klebstoffe sind die einzelnen Hölzer kraftschlüssig verbunden und so insgesamt sehr tragfähig und biegesteif. Holzwerkstoffe werden aus Brettern, Lamellen und zerkleinertem Holz zu Stäben oder Platten gepresst. Die Liste üblicher Holzwerkstoffe ist lang und wächst stetig.

#### Vollholzprodukte:

- Konstruktionsvollholz (KVH, auch Kantholz)
- Balkenschichtholz (Duo- /Triobalken)
- Brettschichtholz (BSH)

#### Holzwerkstoffe:

- Drei- und Fünfschichtplatten
- Furnierschichtholz (FSH und SVL)
- Furnier-, Stab-, Stäbchensperrholz
- OSB-Flachpressplatte
- Spanplatte (FP)
- Holzwoolleichtbauplatten (HWL)
- Holzfasерplatten (HFH, HFM, MDF)
- Holzfasерdämmplatten (Poröse Holzfasерplatten, Bituminierte Holzfasерplatten)
- Gipsfasерplatten
- Zementfasерplatten

Man nähert sich hierbei im Grunde artifiziellen Werkstoffen stark an und erlangt eine ähnliche Flexibilität und Gestaltungsfreiheit wie beispielsweise mit Stahlbeton. Die Vorteile liegen auf der Hand, Holz als nachwachsender Rohstoff mit positiver Ökobilanz kann so auch bei Großbauten zum Einsatz kommen.

Im Vergleich zum traditionellen Holzbau fällt auf, dass die ursprünglichen Vorteile der Reduzierung von Verarbeitungsschritten und Maximierung der Wertschöpfung hierbei zum Teil verloren gehen. Eine Lösbarkeit und Wiederverwendung von Bauteilen ist im Einzelfall denkbar, wird allerdings bei einer stark individualisierten Fertigung und Formgebung eingeschränkt. Holzwerkstoffe werden zugunsten einer prüfbar höheren Qualität häufig direkt aus dem Rohmaterial hergestellt. Bei der Lebenszyklusbetrachtung steigt man so also nicht höchstmöglich in die Kaskade ein und verringert so die Wertschöpfung des Materials. Die Verarbeitung von Leim und Metallteilen erhöht zudem den Verwertungsaufwand und/oder vermindert die Qualität des Rezyklats.

Im Versuch, der aktuellen ökologischen Krise gerecht zu werden, stellt sich die Frage, wie man an den traditionellen Holzbau anknüpfen und diesen mithilfe aktueller Technik optimieren kann, um ihn auch für Großbauten ökonomisch einsetzbar zu machen, ohne dabei seine ökologischen Vorteile zu verringern.

### **1.1.3 Optimierte Vollholzprodukte und Holzwerkstoffe**

Nachdem das Ziel formuliert wurde, den traditionellen Holzbau und zimmermannsmäßige Fügetechniken im zeitgenössischen Kontext neu zu interpretieren und diese durch moderne Planungsmethoden und Fertigungsverfahren flexibel einsetzbar zu machen, folgen nun Möglichkeiten der Umsetzung.

Holzerzeugnisse wurden in den letzten Jahrzehnten besonders hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Wirtschaftlichkeit optimiert. Im Folgenden werden bewährte Produkte anhand wesentlicher Merkmale erläutert und diese anschließend hinsichtlich ihrer ökologischen Optimierbarkeit bewertet.

#### **1.1.3.1 Zusammengesetzte Träger aus Vollholzquerschnitten**

##### *Durchlaufträger*

Durchlaufträger werden eingesetzt, um den Biegemomentenverlauf gleichmäßig zu verteilen und somit das Feldmoment zu entlasten. Dadurch kann der Querschnitt des Trägers verringert werden. Typische Formen von Durchlaufträgern sind Koppel- und Gelenkträger.

Als Koppelträger werden zwei oder mehrere Pfetten bezeichnet, die zu einem Durchlaufträger verbunden werden. Die Stoßpunkte der einzelnen Träger liegen im Bereich der Auflager und sind biegesteif mittels Dübel oder Bolzen miteinander verbunden.

Ein Gelenkträger, auch Gerberträger genannt, besteht aus zwei Einfeldträgern, die an den Enden auskragen und durch einen eingehängten Träger, gelenkig verbunden werden. Die Stoßpunkte der Pfetten werden durch ein Hakenblatt ausgeführt (Gerberstoß). Die Verbindung wird zusätzlich mit Dübeln oder Schrauben gesichert.

Weitere kraftschlüssige Verbindungen von gestückelten Holzträgern sind unter anderem das schräge oder verborgene Hakenblatt, sowie japanische Holzverbindungen.

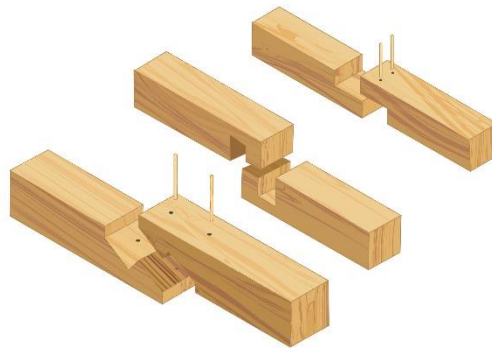


Abbildung A1.3: Längsverbinding  
 [https://www.rosentaler-schrauben.de/magazin/ratgeber-holzverbindungen/.]

### *Gedoppelte Träger*

Bei Gedoppelten Trägern werden zwei übereinandergelegte Vollholzbalken kraftschlüssig verbunden, sodass sie statisch wie ein einzelner Träger wirken.

Die Verbindung kann über eine Verzahnung hergestellt werden, die bei Verpressen der beiden Träger eine Biegebeanspruchung in Druckkräfte umsetzt. Zusätzlich kann eine Lagefixierung durch Dübel oder ein Metallbänder hergestellt werden.

Eine gezielte Vorspannung, also bogenförmige Überhöhung gedoppelter Träger erhöht ebenfalls die Tragfähigkeit. Auch hierbei wird eine Lagesicherung durchgeführt, meist in Form von metallenen Schraubbolzen oder Metallbändern (vgl. Graubner 2016: 94).

Statt einer Verzahnung können zwei Träger mittels Eichenholz-, Einpress- oder Ringdübel miteinander verbunden werden. Kommt es zu einer Druckbelastung des Trägers, wird der Dübel gegen die Stirnseiten der Aussparung gepresst und die Kräfte werden parallel zum Träger verteilt. Um eine Verschiebung der einzelnen Elemente senkrecht zur Krafrichtung zu verhindern, wird dieser Trägertyp ebenfalls zusätzlich mittels Laschen, Bolzen oder Metallbänder stabilisiert. Da die Verbindungen nicht vollständig schubfest sind, muss bis zu einer exakten Berechnung, von einer geringeren Tragfähigkeit im Vergleich zu einem Balken aus Vollholz angenommen werden (vgl. Graubner 2016: 96).

Zusammengesetzte Träger weisen aufgrund der Verwendung von Vollholz und mechanischer Verbindungen bereits sehr gute ökologische Eigenschaften auf. Welche Möglichkeiten es gibt, die Verbindungen stahlfrei und dennoch sehr leistungsfähig zu gestalten, wird im Kapitel 3.2 näher betrachtet.

### **1.1.3.2 Träger aus Leimholz**

Leimholzträger haben im konventionellen Holzbau die mechanisch zusammengesetzten Träger (fast) vollständig abgelöst, da sie in ihrer Herstellung einfacher, präziser und bei gleichen Querschnitten deutlich belastbarer sind.

#### *Balkenschichtholz (Trio Träger / Triobalken, Duobalken)*

Balkenschichtholz wird aus zwei bis fünf Lagen miteinander faserparallel verklebter Bohlen oder Kanthölzer zusammengesetzt. Diese bestehen zumeist aus Nadelholz und werden mit Kunstharzen wie Melaminharz verleimt. Die einzelnen Konstruktionsvollhölzer können mittels einer Keilzinkverleimung zu üblicherweise 18m langen Strängen gefügt werden.

#### *Brettschichtholzträger/-binder*

Brettschichtholz ist ein Hybridholzstoff, der aus mindestens drei faserparallel horizontal geschichteten, zusammengeklebten Brettern oder Brettlamellen besteht. Dadurch werden natürliche Unregelmäßigkeiten des Materials, die sich festigkeits- und somit tragfähigkeitsmindernd auswirken können, ausgeglichen. Brettschichtholz besteht wie Balkenschichtholz überwiegend aus Nadelholz, das mit Kunstharz verleimt wird. Über die Querschnittshöhe können Lamellenlagen von verschiedenen Festigkeiten (Sortierklassen) angeordnet werden. Dabei sind die Bretter im Zugbeanspruchten Bereich des Trägers maßgebend für die Festigkeit des Bauteils. Um die Tragfähigkeit eines BSH-Trägers zu erhöhen, können auch lagenweise Laub- und Nadelholz kombiniert werden. Dabei kommt das Hartholz in den höher beanspruchten Decklagen zum Einsatz. Mit geleimten Brettschichtholzträgern können im Vergleich zu Vollholzträgern deutlich höhere Spannweiten überbrückt werden. Zudem kann die Trägerform durch eine verstellbare Leimpresung optimiert und hinsichtlich der geplanten Belastung (Momentenverlauf) angepasst werden. Die Verklebung begünstigt eine problemlose Bearbeitung des Bauteils mit allen Holzbearbeitungswerkzeugen, somit sind der geometrischen Gestaltung keine Grenzen gesetzt. Das Material kann in eine, zwei oder drei Richtungen gekrümmt werden (vgl. Lückmann 2011: 117). Zudem ist es möglich, biegesteife Rahmenteile herzustellen, welche besonders im Hallenbau statische Vorteile mitbringen.

#### *Furnierschichtholz (FSH), bzw. Structural Veneer Lumber (SVL)*

Furnierschichtholz besteht aus miteinander verklebten Schäl furnierschichten von etwa 3 mm Dicke. Die Längsverbinding der Lamellen wird über Keilzinken hergestellt. Es werden meist Nadelhölzer verwendet, bei höherer Beanspruchung aber auch Buche. Die Schichten werden je nach Einsatz faserparallel oder kreuzweise angeordnet (vgl. Natterer et al. 2003: 42).

Furnierschichtholzprodukte können als Träger mit massivem Querschnitt oder als Hybridbauteile in Kombination mit anderen Holzwerkstoffen eingesetzt werden. So zum Beispiel als folgende Träger-typen:

*Kastenträger* sind zusammengesetzte Querschnitte aus Brettschichtholz als Ober- und Untergurt und seitlich montierten Stegen aus Furnierschichtholzplatten. Die Elemente werden entweder geleimt oder genagelt.

*Vollwandträger, Stegträger*, werden aus einem Ober- und Untergurt aus Brettschichtholz und einem einzelnen, im Querschnitt auf der vertikalen Achse mittig platzierten Steg aus Furnierschichtholz zusammengesetzt.

Der *Wellenstegträger* besteht aus den gleichen Elementen wie ein Vollwandträger, ist jedoch hinsichtlich der Steifigkeit, Tragfähigkeit und des Eigengewichts aufgrund eines wellenförmigen Stegs optimiert.

Leimholzträger sind aufgrund der Verwendung von Kunstharzen, wie Polyurethan oder Melaminharz, ökologisch kritisch zu hinterfragen. Die Herstellung der Kunstharze basiert auf dem fossilen Rohstoff Erdöl und ist außerdem, wie auch die Verklebung der Holzprodukte, im Vergleich zu Vollholzprodukten, mit einem deutlich höheren Energieaufwand und Prozessemissionen verbunden. Hinzu kommt, dass die miteinander verklebten Holzquerschnitte nach Ende der Nutzungsdauer nur schwer sortenrein getrennt und damit hochwertig weiterverwendet werden können. Grundsätzlich könnte ein Brettschichtholzträger entlang der Klebefuge aufgeschnitten werden, um das Vollholz zurückzugewinnen. Aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes findet diese Art des Recyclings in der Praxis nicht statt. Wenn der Weg der stofflichen Verwertung gewählt wird, kommt es zum Downcycling. Je höher der Leimanteil, desto (tendenziell) höher der negative Einfluss auf die Ökobilanz. Man kann Leimholzträger grundsätzlich also ökologisch optimieren, indem man den Leimanteil reduziert, und/oder Klebstoff verwendet, welcher in der Herstellung weniger bedenklich ist. Ein solcher Klebstoff ist jedoch aktuell noch nicht auf dem Markt. Unter den ersten Bindemitteln für Leimholzprodukte

waren Klebstoffe auf Eiweißbasis (Casein). Dieses Bindemittel kommt heutzutage überwiegend zur Restaurierung von historischen Leimholzbauteilen zur Anwendung. Sie gelten nach Angaben der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. jedoch als anfälliger für Feuchtigkeit im Vergleich zu erdöl-basierten Bindemitteln und haben daher ihren Marktanteil und bauaufsichtliche Zulässigkeit verloren. Eine Zulassung im Einzelfall sei jedoch möglich.

### **1.1.3.3 Fachwerk- und Gitterträger**

Fachwerk- und Gitterträger sind materialsparende und sehr leistungsfähige Tragelemente. Sie können bei einfachen, genagelten Verbindungen bis zu 15m Spannweiten überbrücken. Für größere Spannweiten bis zu 35m werden Dübelverbindungen und Verklebungen verwendet. Fachwerk- oder Gitterträger können aus Vollholzprofilen oder unterschiedlichen Holzwerkstoffen bereits im Werk zusammengesetzt werden. Letzteres bringt den Vorteil mit sich, dass durch das gezielte Auspielen der jeweiligen Stärken des Werkstoffs deutlich an Material eingespart werden kann. Gängige Fachwerkträger sind beispielsweise:

#### *Dreiecksstrebenbau-Träger (DSB-Träger)*

Die Ober- und Untergurte enthalten Aussparungen, in die mittels einer Verleimung die Gitterstreben eingezinkt werden. Die Gitterstreben können je nach Tragfähigkeit des Trägers aus zwei, drei oder vier parallel zueinander laufenden Profilen bestehen.

#### *Trigonit-Träger*

Der Ober – und Untergurt eines Trigonit-Trägers besteht aus einem zwei bis drei geteilten Querschnitt und mehrfach geteilten Diagonalstreben. Die Diagonalstreben werden durch eine Keilzinkung miteinander verbunden und an die seitlich montierten Ober und Untergurt-Profile verschraubt oder vernagelt (vgl. Lückmann 2011: 49).

Aufgrund der hohen Vielfalt an materieller Zusammensetzung und Fügung von Fachwerk- und Gitterträgern kann eine Ökobilanz und Optimierbarkeit nicht pauschal benannt werden. Grundsätzlich gelten die gleichen Optimierungsansätze wie bei obengenannten zusammengesetzten und verleimten Trägern. Das Ziel sollte ein möglichst hoher Anteil von Vollholz, gefügt mit möglichst wenig Stahl- und Leimanteilen sein. Die Herausforderung hierbei ist, den optimalen Grad zu finden, in dem eine maximale ökologische Optimierung bei hoher Leistungsfähigkeit, vertretbarem Materialeinsatz und realistischer Umsetzbarkeit möglich ist.

### **1.1.3.4 Holzbewehrungen**

Unabhängig vom statischen System können Holztragwerke aus Nadelholz optimiert werden, indem gezielt Schwachstellen durch den Einsatz von Hartholz verstärkt werden. Dies kann als Lamellenstruktur innerhalb eines BSH-Trägers vorgenommen werden, oder punktuell an besonders beanspruchten Bauteilen, wie beispielsweise den Fügepunkten.

### **1.1.3.5 Massive Wand- und Deckenelemente**

Eine Massivbauweise hat neben bauphysikalischen Vorzügen den Vorteil, gleichzeitig den vertikalen oder horizontalen Raumabschluss bilden zu können. Holzmassivbauteile können einfach miteinander verschraubt werden und sind somit auch einfach rückbaubar. In den letzten Jahren sind einige Systeme von Holzmassivbauelementen auf den Markt gekommen, die ohne Leim- oder Stahlverbindungen auskommen. Die einzelnen Bretter greifen durch Verkämmen oder Vergräten geometrisch so ineinander, dass es keiner weiteren Befestigung bedarf, oder sie werden durch Dübel (quer) oder Leisten (längs) in passgenauen Ausfräsungen verbunden. Die natürliche Eigenschaft des Aufquellens von Holz kommt der Konstruktion hierbei zu Gute, da die geometrische Verbindung somit fest ineinander gepresst wird. Lösbar ist diese Verbindung allerdings nicht mehr.





Abbildung A1.4: Leimfreies Fertigteil als Wand- oder Deckenelement, Holzius  
[Holzius.]

#### 1.1.3.6 Holzbetonverbunddecken (HBV)

Holz-Beton-Verbundsysteme werden überwiegend als Deckenkonstruktion eingesetzt. Dabei werden die baukonstruktiven Stärken der Baustoffe Beton (Druckfestigkeit) und Holz (Leichtigkeit und Zugfestigkeit) mit einander kombiniert. Der kraftschlüssige Verbund der Deckenunterseite aus Holz mit der darüberliegenden Betonplatte führt zu einer deutlichen Steigerung der Tragfähigkeit und ermöglicht größere Spannweiten (bis zu 18m) im Gegensatz zu einer vergleichbar dimensionierten Konstruktion aus Vollholz. Gleichzeitig wird das Eigengewicht im Vergleich zu einer reinen Betonkonstruktion reduziert. Des Weiteren tragen die bauphysikalischen Eigenschaften des Betons zu einer Verbesserung des Schallschutzes, der Wärmespeicherefähigkeit und aufgrund seiner Nichtbrennbarkeit zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit im Brandfall bei. HBV-Systeme unterscheiden sich im Wesentlichen im Grad ihrer Vorfertigung sowie der Art des Verbindungsmittels von Holz und Beton. Beim Einsatz von Ort beton dient die unterseitige Holzdecke als verlorene Schalung, wobei der kraftschlüssige Verbund des Systems nach der Aushärtung des Betons erreicht wird. Des Weiteren können die hybriden Bauteile bereits im Werk vorproduziert und als Fertigteile auf die Baustelle transportiert werden. Die Art der Verbindungsmittel ist sehr vielfältig. In der Regel kommen Verbundschrauben und eingeklebte Steckmetallstreifen zum Einsatz, welche mit der Bewehrung des Stahlbetons verbunden werden können. Die Holzkonstruktion kann als massives Brettstapelelement oder stabförmige Balkendecke ausgeführt werden. Durch die Substitution des auf Zug belasteten Bereichs einer konventionellen Betondecke durch Holz, wird der Anteil an Bewehrung und Beton im Vergleich zu einer konventionellen Betondecke verringert und führt zu einer Verbesserung der Ökobilanz. Der kraftschlüssige Verbund der beiden Materialien führt jedoch den Nachteil mit sich, dass eine sortenreine Trennung und ein hochwertiges Recycling des Bauteils dadurch nur schwer möglich sind (vgl. Lückmann 2011: 117-118).

#### 1.1.4 Optimierte Fügeverfahren

Wie im Kapitel 3.1 hergeleitet, hängt die ökologische Optimierung von Bauteilen zu großen Teilen mit der angewandten Fügeverfahren zusammen. Leimverbindungen, Verbindungen mit Metallerzeugnissen und reine Holzverbindungen werden daher im Folgenden näher untersucht und auf ihre Optimierbarkeit überprüft.

### 1.1.4.1 Leimverbindungen

Die Bindemittel bei der Holzverarbeitung sind üblicherweise auf petrochemischer Basis hergestellte Kunstharze. Neben der Abhängigkeit von dem fossilen Rohstoff Erdöl und der bereits erwähnten hohen grauen Energie und Treibhausgasemissionen, die durch Herstellung und Verarbeitung bei BSH deutlich größer ist als bei Konstruktionsvollholz, können außerdem bei älteren leimhaltigen Holzbauteilen gesundheitsschädliche Emissionen durch Formaldehyd entstehen. Heutzutage ist der Formaldehydanteil im Bindemittel gesetzlich reguliert und der enthaltene Anteil gesundheitlich unbedenklich. Tendenziell steigende Rohölpreise können sich zukünftig negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Kommt es zu einem gezielten Rückbau von verleimten Tragwerkselemente wie BSH, ist eine gleichwertige Wiederverwendung grundsätzlich möglich. Diese ist jedoch mit weiteren Prüfverfahren verbunden. Dazu muss das Tragwerkselement aus Leimholz zusätzlich auf die Beständigkeit der Verklebungen (Klebfugenintegrität) untersucht werden. Das stoffliche Recycling von Holzwerkstoffen wird in der Regel mit steigenden Leimanteil und sinkender Holzqualität beeinträchtigt und führt häufig zu deutlichen Qualitätsminderungen in der Nachnutzung.

Vergleich von Leimanteilen in Holzprodukten:

- KVH 0% Leimanteil
- BSH ca. 0,75% Leimanteil
- Dreischichtmassivholzplatte ca. 2% Leimanteil
- Spanplatte ca. 9% Leimanteil
- MDF-Platte ca. 10% Leimanteil
- OSB ca. 10-15% Leimanteil

Die Kennwerte dienen einer groben Einordnung der Leimanteile in den unterschiedlichen Produkten. Je größer die verleimten Holzzeugnisse sind, desto geringer der Leimanteil. Demnach finden sich in Plattenbaustoffen aus Spänen und Holzfasern die höchsten Leimanteile. Dies sollte aus ökologischer Sicht nur dann akzeptiert werden, wenn das verwendete Holz aus primärer Rohstoffquelle für keine hochwertigere Nutzung geeignet ist, wie beispielsweise Durchforstungsholz, es bereits Vornutzungen bei höherer Qualität gab oder Werksabfälle (z.B. Sägespäne) vor der energetischen Verwertung so noch einer sinnvollen Zwischennutzung zugeführt werden. Bei Holzwerkstoffprodukten, wie OSB, Span und Holzfaserplatten werden diese Kriterien zu einem großen Teil erfüllt. Die genaue stoffliche Zusammensetzung kann jedoch je nach Hersteller und Herkunftsland variieren und sollte produktspezifisch betrachtet werden. Außerdem sind stets, wenn möglich, alternative formaldehydfreie Bindemittel zu bevorzugen, die weder auf Rohöl basieren noch gesundheitsschädlich sind sowie im Optimalfall die Qualität des Materials bei der Verwertung möglichst geringfügig beeinträchtigen. Es existieren hierzu Forschungen zur Herstellung von MDF-Platten aus naturnahen Bindemitteln auf Stärke- und Proteinbasis (Uni Göttingen) (vgl. Schöpfer 2006). Darüber hinaus ermöglicht die Produktion von harten und mittelharten Holzfaserplatten im Nassverfahren, welches auf dem Einfluss von Hitze und Druck basiert, den Verzicht von künstlichen Bindemitteln. Hier kommt das holzeigene Lignin als Bindemittel zu tragen. Dabei kommt es jedoch im Vergleich zum Trockenverfahren, welches auf dem Einsatz von zusätzlichen Bindemitteln beruht, zu einem erhöhten Energieverbrauch. Diese Faktoren gilt es miteinander abzuwägen.



Abbildung A1.5: Keilzinkverbindung [Überwachungsgemeinschaft KVH]

Für Bauteile aus massiven Holzquerschnitten wie Balken- und Brettschichtholz ist zu untersuchen, inwiefern hierbei auf Leimverbindungen verzichtet, oder diese minimiert werden können. Trotz der Tatsache, dass die meisten Holzzeugnisse sogenannte „Plusenergieprodukte“ sind - also bei der energetischen Verwertung mehr Energie erzeugt werden kann, als über den gesamten Lebenszyklus verbraucht wurde - gilt, so viel Vollholz wie möglich, so wenig Leim wie nötig (z.B. Balkenschichtholz statt Brettschichtholz). Darüber hinaus werden im Folgenden beispielhafte Alternativen zu konventionellen verleimten Bauteilen vorgestellt:



Abbildung A1.6: Dübelholzplatte [Peter Kaufmann, Kaufmann GmbH]



Abbildung A1.7: Holz100, einstoffliche Massivholzwand mit Holzdübel *Gedübelte Brettstapel (Wand- und Deckenelemente)* [2020 Thoma Holz GmbH.]

Das gedübelte Brettstapelholz besteht aus hochkant nebeneinanderstehenden, kraftschlüssig verbundenen Brettern. Das Produkt, das seit den 1980ern in Deutschland Verwendung findet, wurde zunächst vernagelt, wird inzwischen aber auch mit Hartholzverdübelungen angeboten. Klemmkräfte halten die Bretter so stahl- und leimfrei zusammen. Es eignet sich als Decken- und Dachelement und kann als BHV-System oder Wandscheibe eingesetzt werden. Durch die Massivität weist das Bauteil sehr gute Schall-, Brand- und Wärmedämmeigenschaften auf. Als freispannende Deckenplatte (Einfeldträger) eingesetzt, können etwa 9m Spannweite überbrückt werden. Je nach Hersteller bestehen durch die Stoßtechnik der einzelnen Bretter Qualitätsunterschiede.

#### *Massivholzschalung*

Als Alternative zu OSB-Platten und Ähnlichem werden leimfreie Plattenelemente zur Beplankung und Aussteifung aus Massivholzbrettern über Schwalbenschwanzverbindungen hergestellt. Mittels Quellbänder werden mehrere Platten miteinander verbunden. Durch Aufquellen des Holzes wird die Platte luft- und winddicht (vgl. Natterer et al. 2003: 19).

#### **1.1.4.2 Verbindungen mit Metallerzeugnissen**

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts werden stabförmige metallische Verbindungsmittel (Passbolzen, Stabdübel, Nagel, Schrauben, Gewindestangen etc.) industriell hergestellt. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts kamen dann Blechformteile als Massenware (z.B. Balkenschuh, Nagelplatte, etc.) hinzu, welche die zimmermannsmäßigen Verbindungen nach und nach ablösten. Vorteile der metallischen Verbindungsmittel sind die einfache Ausführung, der geringe Materialaufwand und die gut zu kalkulierenden Kosten. Es existierten zudem schon früh Belastungstabellen zu den genormten Metallverbindungen, welche für traditionelle Zimmermannsverbindungen fehlten (vgl. Natterer et al. 2003: 19). Durch ihren hohen Härtegrad können stabförmige Verbindungsmittel aus Metall sehr viel schlanker ausfallen als ein Pendant in Holz. Somit wird der Querschnitt auch weniger geschwächt. Auch von außen oder in einem Schlitz eingebrachte Bleche schwächen den Querschnitt kaum bei gleichzeitig sehr hoher Belastbarkeit.

Nachteile von Metallerzeugnissen im Bezug auf ihre Umweltverträglichkeit liegen zum einen im hohen Primärenergiebedarf, zum anderen im Erschweren von zerstörungsfreiem, sortenreinem Rückbau.

Um dem entgegenzuwirken und die Umweltverträglichkeit von Bauteilfügungen wesentlich zu verbessern, sollte wenn immer es aus statischer Sicht nicht unbedingt notwendig ist, auf Metallverbindungen verzichtet werden. Wenn nicht auf sie verzichtet werden kann, sollten stets lösbare Verbindungen den unlösbaren vorgezogen werden (z.B. Schrauben statt Nägel), sodass ein zerstörungsfreier Rückbau und eine Wiederverwendung der Bauteile und Verbindungsmittel möglich sind. Dies ist im Gegensatz zu anderen Verbindungsmethoden ein großes Potenzial, da sich die Metall-erzeugnisse häufig im Laufe der Nutzungsdauer nicht verformen, wie es bei Holz beispielsweise der Fall sein kann.

Der hohe Primärenergiebedarf von Verbindungsmitteln aus Metall sollte möglichst nur dann in Kauf genommen werden, wenn die Art und Qualität des Erzeugnisses eine hohe Lebensdauer und Belastbarkeit, sowie eine Lösbarkeit und die Möglichkeit einer Wiederverwendung ermöglichen.



Abbildung A1.8: Stahlverbinding  
[Ligna Systems.]

### 1.1.5 Reine Holzverbindungen

Wie obenstehend erläutert, sind reine Holzverbindungen die umweltverträglichste Methode, um Holzbauteile zu fügen. Dank technischen Fortschritts und Digitalisierung weiten sich die Einsatzmöglichkeiten von Holzverbindungsmitteln weiter aus und können immer häufiger als Alternative zu verleimten oder mit Metallerzeugnissen gefügten Verbindungen betrachtet werden.

Ergänzend zu den traditionellen zimmermannsmäßigen Verbindungen (Versätze, Zapfen, Holznägel, etc.) bringt modernes Ingenieurwesen auch Hartholznägel,- schrauben und -dübel hervor. Um diese Verbindungen möglichst belastbar auszuführen, kommt es vor allem auf die Passgenauigkeit an, welcher dank moderner Fertigungsverfahren heute keine Grenzen mehr gesetzt sind (vgl. Nat-terer et al. 2003: 18). Zudem existieren verschiedene Forschungsprojekte zur Optimierung von zimmermannsmäßigen Verbindungsmethoden.



Abbildung A1.9: Buchenholzschraube  
[Nur Holz.]

Die Universität Kassel hat sich beispielsweise zum Ziel gesetzt, die historische Zapfenverbindung für den Ingenieurholzbau zu optimieren. Bei der klassischen Zapfenverbindung greift ein Zapfen in ein passgenaues Zapfenloch. Der Ansatz der Forschungsarbeit ist der, mehrere Zapfen in einem Verbindungspunkt übereinander anzuordnen, um die Tragfähigkeit zu erhöhen. Testergebnisse zeigen eine deutlich erhöhte Belastbarkeit im Vergleich zu anderen traditionellen Holzverbindungen. Diese Methode kann vor allem bei großen Holzquerschnitten wirkungsvoll eingesetzt werden und als Alternative zu einem Balkenschuh aus Stahlblech betrachtet werden (vgl. Claus 2016).

	traditioneller Zapfen	Schwabenschwanz-Zapfen	gereihter Zapfen
Abbildung			
Bemerkung	nach: DIN EN 1995/NA Konstruktive Rahmenbedingungen können nicht eingehalten werden!	nach: Z.9.1.649 Empfohlene Zapfenhöhe eingehalten, könnte noch optimiert werden!	nach: exp. Ergebnissen mit DIN EN 1990 Keine Unterscheidung zwischen Zapfen- und Zapfenlochtragfähigkeit möglich!
Zapfen-Tragfähigkeit	$F_{Z,Rk} = 55,1kN$	$F_{Z,Rk} = 17,4kN$	-
Zapfenloch-Tragfähigkeit	$F_{ZL,Rk} = 12,3kN$	$F_{ZL,Rk} = 17,6kN$	-
Gesamttragfähigkeit im Versuch	-	-	$F_{Z,Rk} = 54,7kN$

Abbildung A1.10: Vergleich der typischen Tragfähigkeiten von Holz-Holz-Verbindungen  
[Claus Timo]



Abbildung A1.11: Zapfenstoß  
[Ligna Systems]

Das Quellverhalten von Holz wird hier zu Gunsten der Kraftschlüssigkeit eingesetzt, indem die stabförmigen Verbindungsteile nach Einbringung ihr Volumen vergrößern und so fest in die Ausfräsung gepresst werden. Der Nachteil dabei ist, dass passgenaue Holz-Holz-Verbindungen zumeist nicht lösbar sind. Sie können zwar sortenrein recycelt werden, aber der Rückbau ist meist nicht zerstörungsfrei möglich.

#### 1.1.6 Gebaute Beispiele

Im Folgenden werden einige Beispielgebäude mit monomateriellen Bauteilfügungen aufgeführt:



Abbildung A1.12: Holz-Skelettbau Tamedia Headquarter  
[Shigeru Ban Architects]

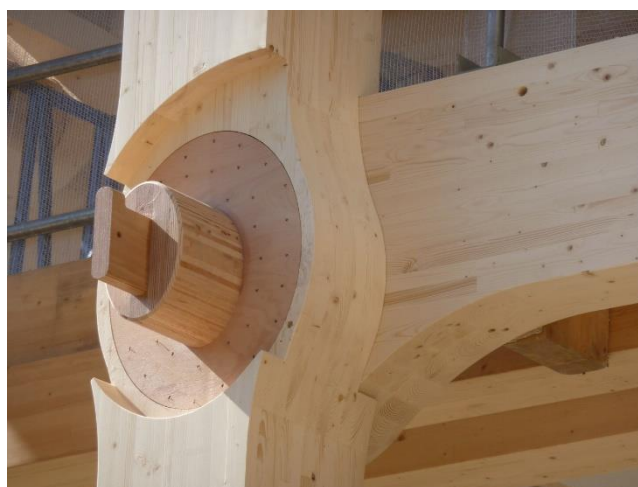


Abbildung A1.13: Holz-Holzverbindung Tamedia Headquarter  
[Shigeru Ban Architects.]

#### 1.1.6.1 Tamedia Headquarter in Zürich (2013), Shigeru Ban:

Das sichtbare Primärtragwerk des fünfgeschossigen Bürogebäudes des Hauptsitzes der Tamedia Mediengruppe, welches 2013 erbaut und von Shigeru Ban entworfen wurde, prägt das Erscheinungsbild und macht den innovativen Charakter des Gebäudes aus. Die spezielle und unverwechselbare Holzkonstruktion besteht aus dreifach blockverleimten Stützen und einer Zangenkonstruktion als Träger (Brettschichtholz, Fichte), welche durch eine reine Holzverbindung miteinander verbunden sind. Der monomaterielle Verbindungspunkt besteht aus einem präzise gefertigten Buchenfurnierholzdübel, der passgenau in das Auflager der ausgefrästen Stütze eingesetzt



wird. Um lastbedingte Verformungen zu vermeiden und den kraftschlüssigen Verbund der Tragwerkselemente zu gewährleisten, ist das Auflager der Stütze beidseitig mit Buchenfurnierholzplatten verstärkt (Holzbewehrung).



Abbildung A1.14: Vorfertigung des Holztragwerks, Finanzparken in Stavanger  
[Sindre Ellingsen]



Abbildung A1.15: Hartholzdübel-Verbindung, Finanzparken in Stavanger  
[Sindre Ellingsen]

#### 1.1.6.2 Finanzparken in Stavanger (2019), Helen & Hard, SAAHA:

Der siebengeschossige Bürokomplex des Finanzparks im norwegischen Stavanger, welcher 2019 fertiggestellt und von den Architekten Helen & Hard und SAAHA konzipiert wurde, zählt zu den größten Holzgebäuden Europas. Die Träger und Stützen des Holztragwerks, sind mittels einer Zangenkonstruktion und Buchenholzrunddübel miteinander verbunden. An den Auflagerpunkten erreichen die Querträger ihre maximale Höhe, wohingegen sie in der Feldmitte organisch und

schwungvoll aufgevoutet wurden. Für die hochbelasteten Tragwerkselemente wurde Buchen-Furnierschichtholz eingesetzt, wohingegen der Rest des Tragwerks aus weniger tragfähigem Fichtenleimholz besteht.



Abbildung A1.16: L-IED Halle, H13 Ingenieure  
[J. Jamnitzky]

### 1.1.6.3 L-IED Halle (2017), ARGE Putzhammer-Meier

Das 2017 fertiggestellte und seitens der Bundeswehr genutzte Hallengebäude zur Erprobung elektronischer Geräte, setzt aufgrund der Nutzung die ausschließliche Verwendung von metallfreien, nicht magnetischen und elektrisch leitenden Baustoffen voraus. Aus diesem Grund besteht die 75m lange und 25m breite Halle aus BSH-Stützen mit Gabelauflager, welche die bis zu 2,3m hohen und freispannenden Satteldachträger aus Brettschichtholz tragen. Um die Formstabilität und Steifigkeit des Trägers zu gewährleisten, ist der Binder beidseitig mit Furnierschichtholzplatten beplankt. Als Verbindungsmittel wurden ausschließlich Holznägel, Klebstoff und Kunstharzpressholz sowie kraftschlüssige Verbindungen durch Formschluss eingesetzt.

### 1.1.7 Optimierte Planungs- und Fertigungsverfahren

Die Einführung von computergestützten Fertigungstechniken in den 1980er Jahren war maßgebend für die Rückkehr des Holzbaus im industriellen Maßstab.

Aufgrund von steigendem Wettbewerbsdruck und Fachkräftemangel gewinnen automatisierte Fertigungsmethoden in der Holzverarbeitenden Industrie stetig an Bedeutung. Die digitale Planung ist im Holzbau besonders sinnvoll, da wirtschaftliche Systembauweisen einen frühen Austausch zwischen Planern und Fachplanern, sowie eine präzise Auftragsgestaltung für die ausführenden Firmen erfordert. Das 3D-Modell stellt die Kommunikationsgrundlage dar, ermöglicht einen schnellen Datenaustausch und sorgt somit für eine effizientere Planung (vgl. Hochparterre AG (Hrsg.) 2020: 21).



Abbildung A1.17: Holzbearbeitung durch computergesteuerte Roboter  
[Robotics in Architecture]

Als wichtigster Baustein der digitalisierten Planungsprozesse im Bauwesen gilt BIM (Building- Information-Modelling).

In digitaler Zusammenarbeit aller Planer und Gewerke entsteht durch BIM ein 3D-Gebäudedatenmodell als gemeinsame Arbeitsgrundlage. Das Modell wird mit detaillierten Informationen zu allen Teilbereichen des Projektes angereichert, bis hin zu einer Simulation des Bauprozesses. Durch Parametrisierung kann das Modell intelligent auf Planungsänderungen reagieren und Probleme erkennen, bevor es zur Umsetzung kommt. Für die Ausführung können schließlich beliebig viele 2D-Pläne generiert werden.

Ein eindrucksvolles Beispiel für parametrisches Design im Holzbau ist das Swatch-Headquarters in Biel (Schweiz, 2019), welches vom dem japanischen Architekten Shigeru Ban und dem Holzbauunternehmen Blumer-Lehmann AG geplant wurde. Das organisch geformte Gebäude besteht aus einem Gittertragwerk, welches aus tausenden individuell geformten Einzelbalken, mittels Steckverbindungen, wie ein Puzzle zusammengesetzt wurde. Die Toleranzen der Konstruktion lagen bei weniger als 5mm. Die Genauigkeit der produzierten Verbindungsteile des Raumtragwerks betrug 0,1 Millimeter (17). Der Bauprozess verlief dank der digitalen Planung und der präzisen Ausführung ohne Probleme. Ein fehlerhaftes Tragwerkselement hätte das Projekt zum Erliegen gebracht. Dieses Projekt steht beispielhaft für das Potenzial BIM-fähiger Software. Wenn die Planung durch konsequenten Einsatz von BIM so präzisiert wird, dass es zu einer reibungslosen und schnellen Ausführung kommt, können sowohl ökonomisch als auch ökologisch enorme Fortschritte erzielt werden. Auch gestalterisch öffnet BIM neue Türen, da komplex geformte Bauteile, wie das Gittertragwerk von Ban und der Blumer-Lehmann AG so bewältigt werden können.



Abbildung A1.18: Swatch und Omega Headquarter, Shigeru Ban  
 [Shigeru Ban. Foto: Didier Boy de la Tour..]

In Bezug auf die Nachhaltigkeit bringen BIM-basierte Arbeitsprozesse außerdem das Potenzial mit, einen möglichen Rückbau sowie Daten über den Lebenszyklus eines Gebäudes im 3D-Modell zu integrieren. Diese Informationen können als Grundlage für das langfristige Gebäudemanagement, für Optimierungsmaßnahmen und schließlich für einen sinnvollen Rückbau am Ende der Nutzungszeit dienen. Durch die unkomplizierte Ausgabe von Mengendaten können außerdem Bilanzen gezogen werden, beispielsweise in Bezug auf Energieeffizienz und Materialeinsatz. Dadurch wird die Möglichkeit der Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen und einer kreislaufgerechten Rohstoffnutzung geschaffen (vgl. Hochparterre AG (Hrsg.) 2020: 13). Das Einpflegen und Nutzen dieser Daten berücksichtigt folglich einen dynamischen Lebenszyklus von Rohstoffen und Gebäuden und maximiert deren Wertschöpfung und Nutzungsdauer.

#### 1.1.7.1 Optimierte Fertigungsprozesse

Die Grundlage moderner Fertigungstechnik ist der Einsatz von CNC (Computerized Numerical Control)-gesteuerten Abbundanlagen. Ihre Verwendung ist nicht nur zeitsparend und somit wirtschaftlich, sondern ermöglicht auch eine hohe Präzision und Qualität in der Vorfertigung. Moderne Maschinen können binnen Sekunden zwischen verschiedenen Aufsätzen für gängige Holzbearbeitungsmethoden wie Fräsen, Zuschnitt, Hobeln, Schleifen, Bohren etc. wechseln und Bauteile von bis zu 6 Seiten (sechs-achsig) uneingeschränkt in allen Winkeln und Neigungen bearbeiten. Dadurch können Träger, Decken- und ganze Wandbauteile aus Vollholzelementen in beliebigen Formen vorgefertigt werden und sogar komplexe Bauteile aus mehrfach gekrümmten Geometrien erstellt werden. Neben Abbundanlagen finden zunehmend Industrie-Roboter Einzug in holzverarbeitende Betriebe. Die computergesteuerten Roboter können Holzbauteile gleichermaßen präzise und vielfältig bearbeiten und zusätzlich die Bauteile im Raum anordnen und zu komplexen Formen zusammensetzen. Der Einsatz von Robotern erleichtert die Erzeugung von freien Formen und Sonderlösungen und ermöglicht eine hohe Genauigkeit (vgl. Hochparterre AG (Hrsg.) 2020: 22).



Abbildung A1.19: Holz100, Roboter bei Herstellung von einstofflicher Massivholzwand  
[Foto: 2020 Thoma Holz GmbH]

Beide Techniken können wesentlich zur Neuinterpretation von traditionellem Holzbau beitragen. Die millimetergenaue Fertigung ist für die Realisierung von kraftschlüssigen Holz-Holz-Verbindungen unabdingbar. Verbindungspunkte von Bauteilen stellen tendenziell einen Schwachpunkt des statischen Systems dar und bedürfen daher besondere Aufmerksamkeit in der Planung und Umsetzung. Mit steigender Präzision der Ausführung von Knotenpunkten wächst die Kraftschlüssigkeit und somit die Belastbarkeit des Materials und vergrößert somit das Spektrum des Einsatzbereichs. So können dank CNC-basierter Vorfertigung und Roboter-gestützter Montage traditionelle Verzahnungen, Zapfen-, Blatt- und Dübelverbindung, sowie Holzbewehrungen und Hybridbauteile so hergestellt werden, dass sie für deutlich höhere Belastungen und größere Spannweiten nutzbar sind.

### 1.1.8 Recycling

Der Begriff Altholz umfasst jede Art Hölzer oder Holzwerkstoffe, welche nach ihrer Nutzung als Abfall eingeordnet werden. Die dafür zuständige Abfallverordnung unterscheidet dazu zunächst zwei Untergruppen: die Industrieresthölzer und das Gebrauchtholz. Erstere sind Nebenerzeugnisse, Reste und Sägespäne aus der Holzindustrie und werden lediglich als Abfall eingeordnet, wenn sie nicht mehr als Produkt oder dem industriellen Kreislauf dienen können und energetisch entsorgt werden müssen.

Unter den Begriff Gebrauchtholz fallen unter anderem Produkte aus dem Baugewerbe, Holz aus dem Siedlungs-, Industrie- und Gewerbebereich sowie Abbruchholz.

Die Voraussetzung für das Recycling von Holzprodukten ist zunächst die sortenreine Trennung von Altholz und anderen Abfällen. Dazu kategorisiert die Altholzverordnung die Abfallprodukte in vier Klassen, die sich nach der Bearbeitung und Behandlung des Holzes richtet:

A I: Naturbelassenes Holz

AII: Verleimt, beschichtetes, lackiertes Holz (ohne PVC oder halogenorganische Verbindungen)

AIII: Halogenorganische Verbindungen in der Beschichtung (z.B. PVC) ohne Holzschutzmittel

AIV: Kontaminiert durch Holzschutzmittel

## Stoffliche und thermische Verwertung

Altholz der Klassen AI-II, sowie AIII mit Einschränkungen, können durch Kompostierung stofflich verwertet werden. Außerdem können sie nach dem Prinzip der Kaskadennutzung recycelt werden. Das bedeutet, dass das Holzprodukt dem Verwertungskreislauf wieder zugeführt wird und in einem Downcyclingprozess zu einem neuen Produkt mit geringerer Leistungsfähigkeit aufbereitet wird. Der größte Anteil von Restholz der Klassen AI-III fällt in der Holzindustrie in Sägewerken an. Ein großer Anteil dieser Reststoffe wird energetisch für die Trocknung von Frischholz vor Ort verwertet. Der Hauptabnehmer der ausgelagerten Nebenprodukte wie Späne, Scheite und Verschnittreste ist die Holzwerkstoffindustrie. Hier werden die verschiedenen Holzspäne gemäß der Größe und physikalischen Eigenschaften zu einem gewissen Anteil zu Werkstoffplatten wie Spanplatten verarbeitet. Die weiterverarbeitenden Industriezweige sind die Möbelindustrie, die Zellstoff- sowie die Nahrungsmittelproduktion. Die Anteile von Rest- oder Altholz bei der Herstellung von Holzwerkstoffplatten sind in Deutschland jedoch gering. In der Regel kommt es hier zum Einsatz von Industrieböhlern.

Altholz der Altholzklasse AIV ist Sondermüll, der in der Regel zerkleinert und thermisch verwertet, oder auch auf einer Deponie endgelagert wird. Die energetische Verwertung findet in Biomasseverbrennungsanlagen statt. Hier kommen spezielle Filter zum Einsatz, um Gase, die durch das Verbrennen von Lacken etc. entstehen, aus dem Abgasen zu filtern. Die Verbrennungsanlagen tragen einen geringfügigen Beitrag zum erneuerbaren Strommix bei. Lediglich ein Fünftel des in Deutschland anfallenden Altholz wird stofflich weitergenutzt. Der Hauptabnehmer ist die Spanplattenindustrie. Der verbleibende Anteil wird ohne eine weitere Zwischennutzung thermisch verwertet (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 65).

Eine umfangreichere stoffliche Verwertung von Altholz aus Abrissbaustellen scheitert zumeist an der schwierigen Lösbar- bzw. Trennbarkeit der Baustoffe, der Kontaminierung der Holzes durch schwermetallhaltige Farben, Lacke und Holzschutzmittel (Gebäude aus den 60er- und 70er-Jahren), sowie an dem hohen Aufwand einer Klassifizierung, um den genauen Grad der Kontaminierung zu bestimmen. Die Wiederverwendung und Rückgewinnung von Massivholzelementen, wie die Brettlagen eines Brettschichtholzelements, ist theoretisch durch ein Auftrennen entlang der Klebefugen möglich, findet jedoch in der Praxis zurzeit (noch) keine Anwendung.

Auf einem Recyclinghof wird das Altholz gereinigt sowie manuell nach Augenschein vorsortiert und Störstoffe entfernt. Im Anschluss werden die Holzreste mittels Hack- und Brechmaschinen zerkleinert, wobei der Mahl- und Zerkleinerungsgrad von der Nutzung des Rezyklats abhängt. Die Sieblinie kann von Spänen bis zu Holzmehl variieren. Das Rezyklat kann dann zu Span- und Faserplatten weiterverarbeitet oder thermisch genutzt werden.

Eine Studie der TU München, welche sich mit der Kreislaufwirtschaft und der Kaskadennutzung von Holz beschäftigt, hat außerdem gezeigt, dass durch ein Abtragen von wenigen Millimetern der obersten Schicht des Holzes nahezu alle schädliche Substanzen entfernt werden können (vgl. Fraunhofer-Gesellschaft (Hrsg.) 2017).

Diese Betrachtung eröffnet neue Möglichkeiten der Wiederverwendung oder stofflichen Verwertung von Holzbauteilen, welche normalerweise in die Altholzklasse IV eingeordnet werden.

Dem stehen ökonomische Aspekte wie der Mehraufwand der zerstörungsfreien Demontage, die Kosten der Logistik, Nachbehandlung und der Prüfung der Gebrauchstauglichkeit gegenüber. Diese Kosten sollten die der thermischen Verwertung möglichst nicht übersteigen (vgl. Dechanstreiter et al. 2015: 152-153).

Eine Wiederverwendung von tragenden Holzbauteilen ist fast ausschließlich bei der Restaurierung von historischen Gebäuden gängige Praxis. Vor einem Wiedereinbau müssen aufwendige Untersuchungen bezüglich Verformung, Mängel und Schäden, Oberflächenbeschaffenheit, Tragfähigkeit, chemische Behandlungen (Kontaminierung), sowie Feuchtegehalt, Schädlings- und Pilzbefall durch-

geführt werden. Bei der Wiederverwendung von Leimholzbauteilen, wie einem Brettschichtholzbinde, kommt zu den o.g. Aspekten die Gewährleistung der Klebfugenintegrität erschwerend hinzu. Erst wenn haftungsrechtliche, statische und bauphysikalische Zweifel beseitigt werden können, darf das Bauteil wieder als solches eingesetzt werden. Begünstigender Faktor für eine Wiederverwendung ist die Bearbeitbarkeit des Altholzes. Durch Sägen und Schleifen kann ein Bauteil gegebenenfalls an neue Anforderungen angepasst werden.

Um eine Kaskadennutzung oder Wiederverwendung von Altholz aus Abrissbaustellen zu vereinfachen und somit das konservierte Kohlenstoffdioxid möglichst lange zu binden, sollte die Nachnutzung zukünftig bereits bei der Erbauung des Gebäudes berücksichtigt werden. Dazu sollte ein konstruktiver Holzschutz und ein materialgerechter Einsatz von Holzprodukten einen langfristigen Erhalt der Qualität gewährleisten. Außerdem kommen Lösbarkeit und Monomaterialität der Bauteile einer hochwertigen Weiternutzung zu Gute.

### **1.1.9 Regionalität**

Die jahrhundertealte Tradition des Baustoffs Holz ist nicht zuletzt durch die überwiegend landesweite Verfügbarkeit des Materials in heimischen Waldgebieten begründet. Seit Beginn des Bauens nutzen die Menschen im Rahmen ihrer Transportmöglichkeiten die Rohstoffe der hiesigen Wälder zur Errichtung von Gebäuden, Schiffen und Brücken und anderen Konstruktionen. Die Eigenarten des natürlichen Vorkommens und der Holzart, sowie die möglichen Bearbeitungstechniken setzten lange Zeit die konstruktiven Rahmenbedingungen und Anwendungsmöglichkeiten. Heute besteht eine moderne Holzindustrie, die sich aus Sägewerken, der Holzwerkstoffproduktion und anderen holzbearbeitenden Betrieben zusammensetzt und Holz, in Abhängigkeit des Standorts, aus dem ganzen Land bezieht. Neben einem relativ kleinteiligen und landesweiten Netz von Holzverarbeitenden Betrieben im tendenziell kleineren Maßstab, verteilt sich eine geringere Anzahl spezialisierter und industrialisierter Produktionsstandorte auf das ganze Land. Dabei ist der Produktionsstandort nicht zwingend an hiesige Wälder geknüpft. Daher hat die großmaßstäbliche Holzindustrie, in Abhängigkeit des Standorts und der verwendeten Rohstoffe (Herkunft des Holzes), die Vorzüge der Regionalität verloren und ist mit transportbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden, die die positive Ökobilanz des Rohstoffes schmälern. Daher gilt es stets heimische Holzarten aus der regionalen Holzindustrie anderen Rohstoffquellen und insbesondere Importgut, wie Tropenholz, vorzuziehen.

In der näheren Umgebung um Detmold befinden sich zwei bedeutsame Zentren der Forstindustrie und Holzwertschöpfung (Säge- und Holzwerkstoffindustrie). Die Stadt selbst befindet sich in der Region Ostwestfalen-Lippe, welche ca. 150.000ha Waldfläche (16% der Waldfläche in NRW) und ca. 19% der landesweiten Holzvorräte (359m<sup>3</sup>/ha) umfasst. In dieser Region dominieren Buchenbestände mit ca. 31% das Waldvorkommen. Die Forstregion in Südwestfalen (u.a. Sauerland), umfasst ca. 310.000ha Waldfläche, stellt das größte Waldvorkommen in NRW dar, welches mit ca. 60% von Fichtenbeständen geprägt wird. Darüber hinaus können ca. 30% des landesweiten Umsatzes (NRW: 404 Mio. EUR p.a.) der südwestfälischen Forstwirtschaft zugeschrieben werden. Zudem gilt die Region im landesweiten Vergleich, hinsichtlich der Beschäftigten (1.087 von 2.581, ca. 42%) und Umsatz (397 von 709 Mio. EUR p.a., ca. 55%), als Zentrum der Sägeindustrie in NRW. In der Region Südwestfalen befinden sich verschiedene Produktionsstandorte für Tragwerkelemente wie KVH, BSH, FSH und Duo- und Triobalken (Fichtenholz) sowie Holzwerkstoffprodukte, wie OSB- und Holzfaserverplatten (z.B. Egger, Sonae Arauco, Hüttemann). Laut der Informationen seitens „Holz und Wald NRW“ können Sondersortimente aus Laub- und Nadelholz, wie Eiche und Lärche, bei Bedarf in regionalen Sägewerken bereitgestellt werden, was besonders für die Anwendung im Bereich der Fassadenbekleidung interessant ist (vgl. Wald und Holz NRW (Hrsg.) 2014, Goerke o.J., Schwarz 2019).



Abbildung A1.20: Waldgebiete um Detmold. Grafik: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main

[<https://www.bkg.bund.de/DE/Produkte-und-Services/Shop-und-Downloads/Landkarten/Karten-Downloads/Themenkarten/Themenkarten-2014/Deutschlandkarte-Wald.html>.]



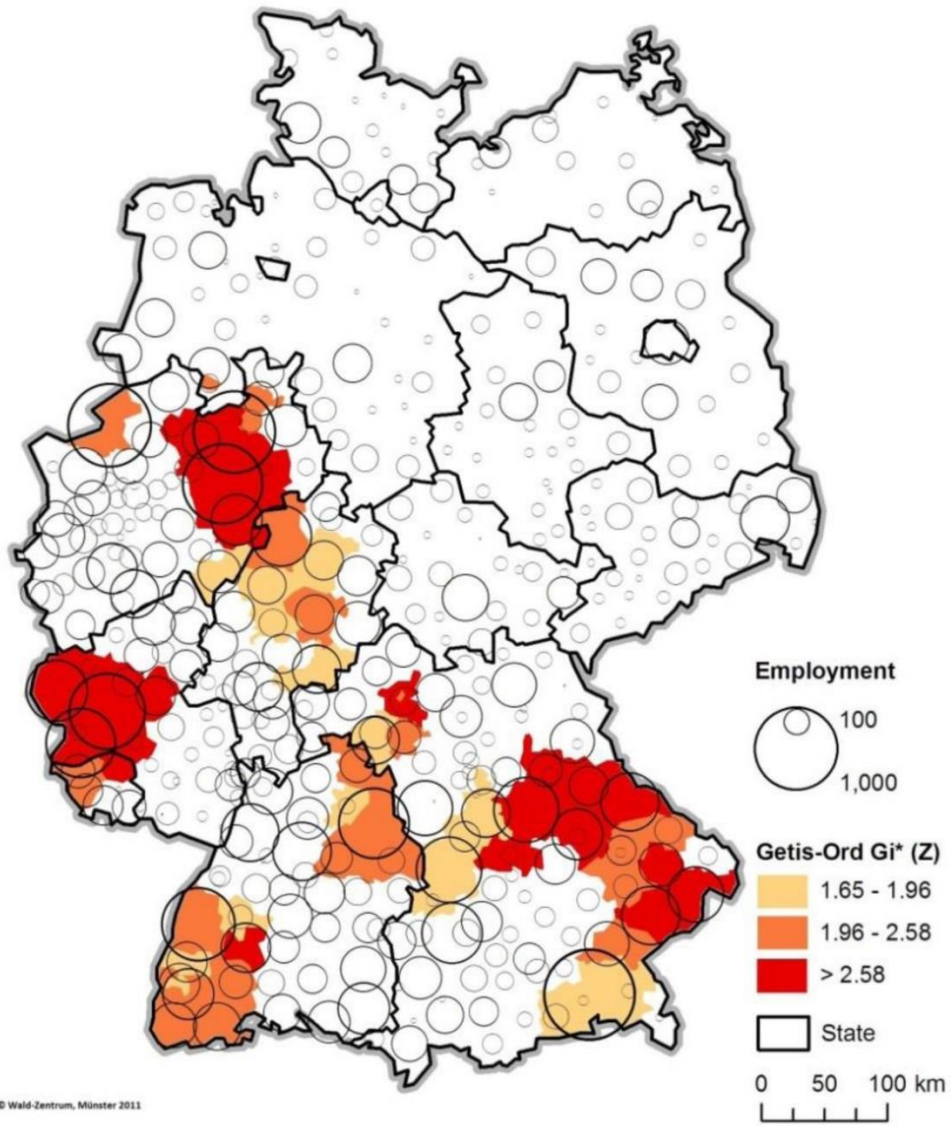


Abbildung A1.21: Beschäftigtenzahlen in der Baubranche im Jahr 2011  
[Wald-Zentrum, Münster 2011]

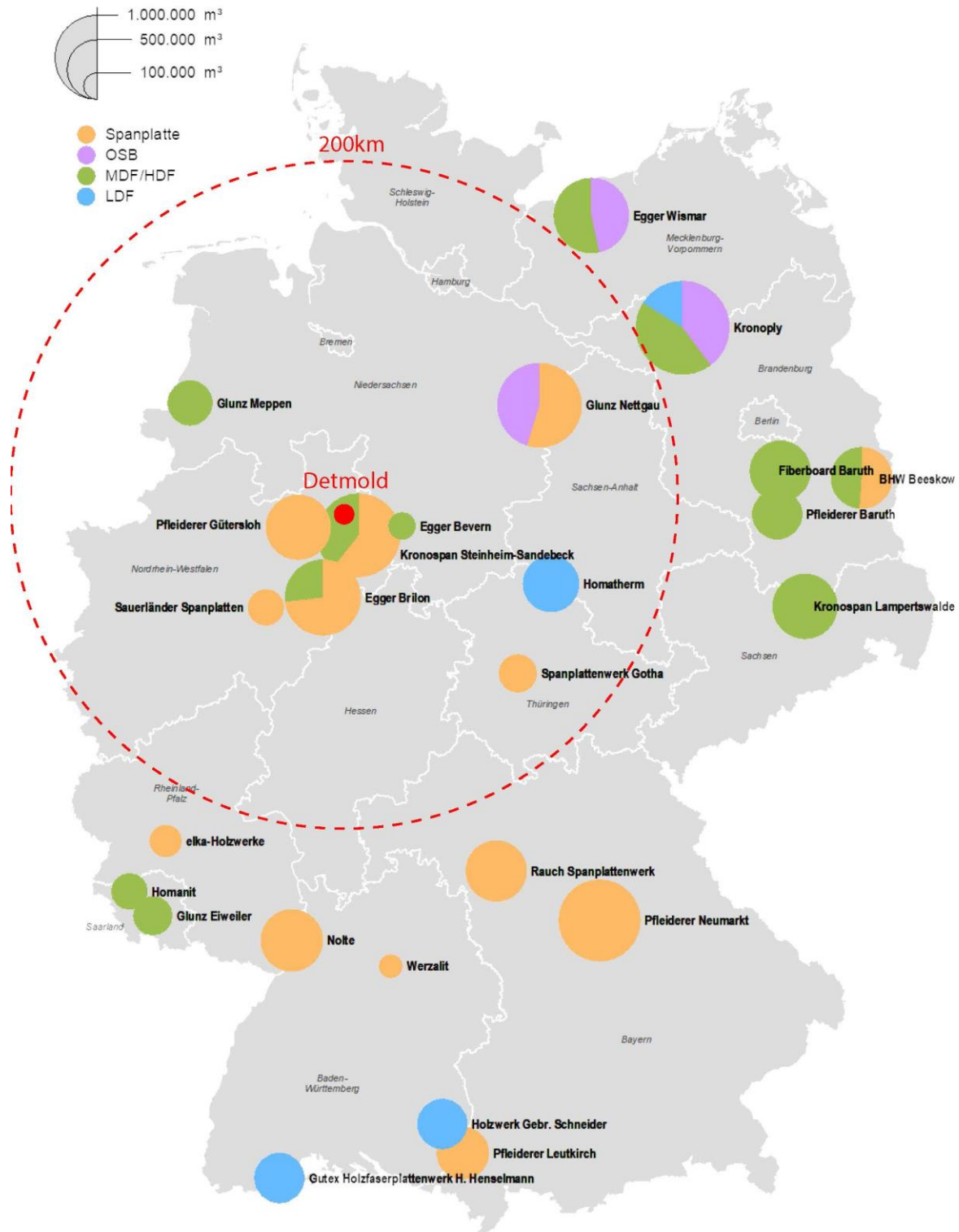


Abbildung A1.22: Produktionsstandorte der Holzwerkstoffindustrie [Döring et al. 2017:15]

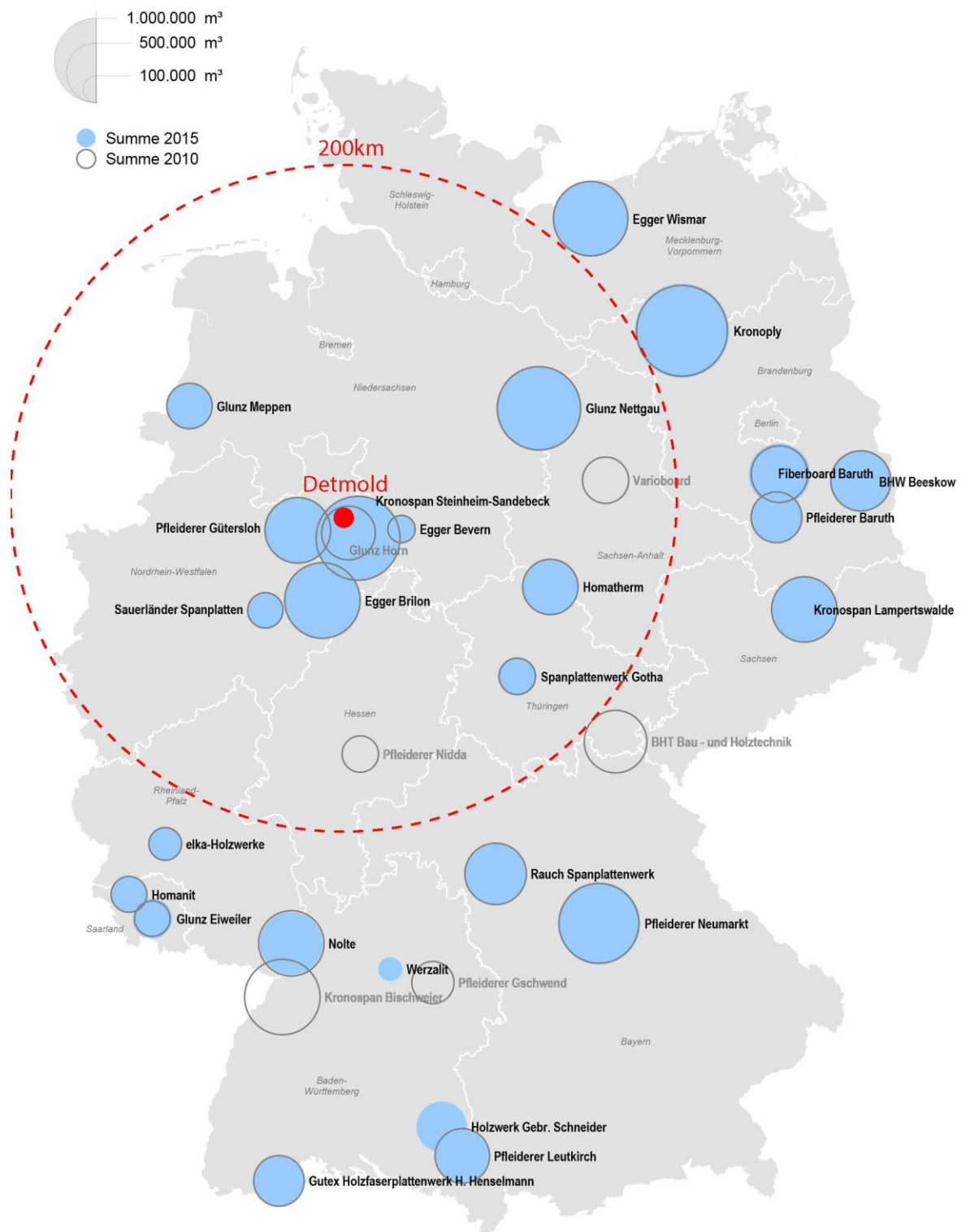


Abbildung A1.23: Produktionsstandorte der Holzwerkstoffindustrie in den Jahren 2010 und 2015 [Döring et al. 2017:15]

Der Abschlussbericht der Studie „Holzwerkstoffindustrie 2015“ (vgl. Döring et al. 2017) zeigt, dass eine Vielzahl potenzieller Holzwerkstoff-Hersteller im Umkreis von 200km um Detmold ansässig sind. Es wird deutlich, dass im definierten Einzugsgebiet die Herstellung von Spanplatten dominiert. Hier liegt jedoch ein großer Anwendungsbereich in der Möbelindustrie. Darüber hinaus können leichte (LDF), mitteldichte (MDF), hochverdichtete Faserplatten (HDF) und OSB-Platten aus der Re-

gion bezogen werden. Die Eigenrecherche hat gezeigt, dass die Betrachtung von Produktionsstandorten jedoch lediglich einen Status quo widerspiegelt und stets auf die Aktualität hinterfragt werden muss. Produktionsstätten können zusammengelegt werden, neu eröffnen oder das Sortiment umstellen, sodass eine abschließende Aussage zur regionalen Verfügbarkeit der Produkte sowie die verwendeten Rohstoffquellen und daraus resultierenden Transportemissionen im Rahmen der zweiten Forschungsphase eingehend untersucht und bewertet werden sollen.

#### **1.1.10 Fazit**

Wie in der vorangehenden Analyse aufgezeigt, ist die Übertragung des historischen Holzbaus hinsichtlich der zeitgenössischen Interpretation traditioneller und zimmermannsmäßiger Verbindungsmittel auf kontemporäre und anspruchsvolle Gebäude, wie z.B. dem großmaßstäblichen Museumsbau, unter konstruktiven Gesichtspunkten möglich und im Rahmen von Pilotprojekten, wie beispielsweise dem Tamedia Hauptgebäude in Zürich (2013, Shigeru Ban), bereits realisiert. Moderne und hochbeanspruchte Holz-Holzverbindungen stellen jedoch Sonderlösungen dar, sodass die Entwicklung eine individuelle Betrachtung der Konstruktion und einen umfangreichen Planungsprozess voraussetzt. Zudem fällt auf, dass Holztragwerke moderner Großprojekte, auch wenn Verbindungsmittel aus Holz zur Anwendung kommen, überwiegend aus Leimholz bestehen. Auch wenn der Bindemittelanteil in Leimholzprodukten gering ist, weisen sie ein deutlich höheres Treibhausgaspotential als die meisten Vollholzprodukte auf, sodass die negativen Auswirkungen auf die Ökobilanz des Gebäudes kritisch hinterfragt werden können. Kommt es zu der Frage einer potenziellen Wiederverwendung nach Ablauf der Lebenszeit von Leimholzbauteilen, wie einem BSH-Binder, führen diese Bauteile, Hindernisse in Form von zusätzlichen Prüfverfahren mit sich. Um den großmaßstäblichen und anspruchsvollen Holzbau zukünftig, durch eine schrittweise „Rückkehr“ zum traditionellen Holzbau ökologisch zu optimieren, besteht weiterer Forschungsbedarf, hinsichtlich der Frage, inwiefern leimarme/ leimfreie Holzquerschnitte und stahl- und leimfreie Fügeverfahren (Fachwerkträger, verzahnter Träger, Stütze-Träger oder Ähnliches) unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten realisierbar sind.

## 1.2 Beton

### 1.2.1 Einleitung

Beton ist aufgrund einer Vielzahl von bauphysikalischen und konstruktiven Vorteilen allgegenwärtig, in nahezu allen Bauaufgaben vertreten und aus dem modernen Bauen nicht mehr wegzudenken. Der mineralische Baustoff kann in jede Form gegossen werden, ist hoch druckfest und kann in Kombination mit Zuelementen aus Stahl große Spannweiten problemlos überbrücken. Er ist chemisch widerstandsfähig, nicht brennbar und bietet im Brandfall einen guten Schutz durch einen hohen Feuerwiderstand. Dazu ist Bauen mit Beton ökonomisch günstig.

Besonders im Bereich von Großbauten, die auf eine hohe Nutzerzahl ausgelegt sind und daher in der Regel große Räume und weite Spannweiten unterbringen, kann das Material dank seiner Eigenschaften punkten. Auch Bauherren, Planer und Architekten von Museumsbauten wissen die konstruktiven, aber auch gestalterischen Vorzüge der Bauweise in Beton zu schätzen:

- nahtlose Übergänge von Wand und Decke,
- einheitliche und neutrale Oberflächen ohne weitere Verkleidungen,
- weite Spannweite für große Ausstellungs- und Versammlungsräume,
- Erfüllung höchster Anforderungen im Bereich des Brandschutzes.

Trotz der vielen Vorteile von Beton wird das Material im Zuge der Klima- und Ressourcendebatte kontrovers diskutiert. Daher stellt sich nun die Frage, ob der Baustoff (Stahl-)Beton unter den Vorgaben der Errichtung eines nachhaltigen, ressourcenschonenden und zukunftsweisenden Museumsbaus eingesetzt werden kann. Der folgende Text liefert zum einen eine Diskussionsgrundlage über den Baustoff Beton und gibt zum anderen Aufschluss darüber, inwiefern Beton ökologisch und ressourcenschonend optimiert eingesetzt werden kann.

### 1.2.2 Historischer Überblick

Die Anfänge der Entwicklung des Baustoffs Beton beginnen mit der Verwendung von Kalkmörtel im Altertum. Die Römer entwickelten den Mörtel weiter und erfanden durch die Kombination von Puzzolanen, Ziegelmehl, Sand, gebranntem Kalk sowie Natur- oder Ziegelstein den ersten Beton: Opus caementicium. Das Gemisch aus Mörtel und Gesteinskörnung wurde in den Hohlraum zweier Wände verfüllt und mechanisch verdichtet. Die Römer nutzten die Druck- und Wasserfestigkeit des Betons beispielsweise beim Bau der Fundamente des Colosseums (72-80 n.Chr.), welches sich zur Zeit der Erbauung in einem Sumpfgebiet befand. Darüber hinaus stellten die Römer ihr technischen Wissen über „Opus caementicium“ beim Bau der über 43m frei spannenden Kuppel des Pantheons (ca. 114 - zw. 125 u. 128 n.Chr.) unter Beweis. Um die Konstruktion bezüglich des Gewichts zu optimieren wurde der Querschnitt exakt dem Kräfteverlauf angepasst und die Kuppel kassettiert. Darüber hinaus verwendeten die Römer Betone mit unterschiedlichen Dichten, so dass das Eigengewicht der Konstruktion nach oben hin abnimmt. Im unteren Bereich der Kuppel kamen Zuschläge aus Ziegelbruch, in der Mitte Tuff, darüber aus Bims und im letzten Ring, an der kreisrunden Öffnung (Okulus), Hohlkörper in Form von leeren Amphoren zum Einsatz.



Abbildung A1.24: Opus caementicium, Pantheon (128 n. Chr.), Rom

[<https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/baustoff-beton-geschichte/>]

Mit dem Zerfall des römischen Reiches ging auch das bautechnische Wissen verloren und konnte im Verlauf des Mittelalters und der frühen Neuzeit nicht wiederentdeckt werden.

Mit der Patentierung des Portlandzementes im Jahr 1824 von Joseph Aspdin und der entscheidenden Weiterentwicklung durch die Erhöhung der Brenntemperatur 1844 durch Isaac Charles Johnson wird das moderne Betonzeitalter eingeleitet. Portlandzement hat gegenüber dem auf Puzzolanen basierten Bindemittel der Römer den Vorteil, dass er schneller trocknet. Anfänglich wurde das Material als Stampfbeton ohne Armierung verwendet. 1849 kombiniert der Franzose Joseph Monier Beton mit einem Eisengeflecht und ebnete den Weg für die Entwicklung der Stahlbetontechnologie. Genaue Berechnungsverfahren sowie die kontinuierliche Weiterentwicklung des Zusammenspiels der Materialien Stahl und Beton machten den Baustoff schnell sehr leistungsfähig. Die Erfindung des Spannbetons 1890 (C.F.W. Döhring) ermöglichte die Überbrückung von immer größeren Spannweiten bei einer Verringerung des Querschnitts. Schnell wurden die Vorteile der neuen Bauweise klar: Der Querschnitt von Bauteilen aus Stahlbeton ist beliebig anpassbar und kann nahezu jeder Belastung standhalten. Zudem weist das Material im Vergleich zu Stahl und Holz eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Feuer auf. Hinzu kommt ein wesentlicher ökonomischer Vorteil: Stahlbeton, abgesehen vom industriell erzeugten Stahl, besteht aus preiswerten und allorts verfügbaren Baustoffen: Zement, Sand, Wasser, Kies. Die Materialeigenschaften ermöglichten eine neue Art des Bauens: die monolithische Skelettbauweise (nahtloser Übergang zwischen den Bauteilen), die ohne aussteifende und tragende Wände auskommt.

Die neue Bauweise setzt sich am schnellsten für Bauaufgaben im Bereich von Fabrik-, Produktions- und Wirtschaftsgebäuden sowie anderen Hallenbauten durch. Beton wird anfangs überwiegend aus wirtschaftlichen, konstruktiven und statischen Gründen eingesetzt, sodass Fassaden nach wie vor

im historischen Stil errichtet wurden. Mit dem Bau der Breslauer Jahrhunderthalle im Jahr 1913, welche die bautechnischen Errungenschaften dieser Zeit demonstrieren sollte, wurde erstmalig seit der Antike, eine Kuppel aus Beton konstruiert, die die Spannweite des Pantheons in Rom übertreffen konnte. Die Berechnung der 65-Meter weitgespannten Kuppel ist eine ingenieurstechnische Meisterleistung. Zudem wurde Stahlbeton als sichtbares Material der Fassade erstmalig für ein repräsentatives Gebäude dieser Größenordnung eingesetzt.

Durch die Entwicklung der Kunst- und Stilepoche der „klassischen Moderne“ entsteht zum Beginn des 20. Jahrhunderts ein neuer kubisch-rationaler Architekturstil. Die Vertreter dieser neuen Formensprache verfolgten das Ziel, dass die gesellschaftlichen, politischen und sozialen Umbrüche dieser Zeit, aber auch der technologische Fortschritt und die Errungenschaften der Bauindustrie sich in der Architektur (sichtbar) widerspiegeln. Trotz innovativer und richtungsweisender Gebäude in Stahlbetonweise, spielte das Material als sichtbarer und repräsentativer Baustoff lange eine untergeordnete Rolle. Grund dafür war der harte Bruch mit vorangehenden Architekturstilen. Die neue Formensprache fand weder beim Großteil der Gesellschaft noch in breiten Kreisen der Architektenschaft Anerkennung. Nachdem zweiten Weltkrieg änderte sich diese Sichtweise. Nun war eine klare Abgrenzung zu den vorangehenden Stilen gewünscht, um den Beginn einer neuen Zeit zu verdeutlichen. Zudem war der Bedarf nach günstigen Baustoffen im zerstörten Deutschland groß (vgl. Kind-Barkauskas et al. 2009: 10-29).

Die Entwicklung von Fahrmischern (1958) ermöglichte die Verwendung von Transportbeton. Dadurch konnte die Qualität des Werkstoffes durch eine Vorfertigung in den Betonwerken deutlich gesteigert werden. Neben den Vorzügen von Ortbeton fanden seit den 1950er Jahren vermehrt Betonfertigteile Anwendung. Sie ermöglichen hohe Präzision durch die werksseitige Vorfertigung sowie eine schnelle Montage auf der Baustelle. Vorgefertigte Wand- und Deckenelemente finden, z.B. in sozialen Wohnanlagen (Plattenbauten), Verwaltungs- und Industriegebäuden Anwendung.

Die Architekten und Planer schätzen seitdem die geringen Materialkosten, die fast uneingeschränkte Gestaltungsfreiheit der Form und Oberfläche sowie die konstruktiven und bauphysikalischen Vorteile. Daher steht Beton seit dem Einzug der Stilrichtung der Moderne in die Architekturwelt und spätestens nach dem zweiten Weltkrieg symbolisch für modernes Bauen und prägt nahezu weltweit das Bild der Städte und der Infrastruktur.

Seit der großmaßstäblichen Anwendung von Beton ist jedoch die Meinung zwiespalten: elegante, funktionale und fortschrittliche Architektur auf der einen Seite und graue, monotone Plattenbauten auf der anderen. In jüngerer Geschichte ist ein weiterer negativer Aspekt hinzugekommen: die Zementproduktion belastet das Klima und beim Abbau der notwendigen Ressourcen Sand, Kalk und Kies entstehen erhebliche Umweltschäden. Um dieses Problem zu lösen, suchen Experten Wege, den Beton klimafreundlicher und ressourcenschonender zu machen.

Es steht fest, die Entwicklung des Baustoffs Beton ist noch nicht abgeschlossen.

### **1.2.3 Anwendung**

Heute sind Beton und Stahlbeton Hochleistungsbaustoffe, die vielseitig nutzbar sind und für nahezu jeden Einsatzbereich eine konstruktive Lösung bieten. Beton ist ein „Alleskönner“ und stellt daher das meistverbaute Material in Deutschland dar. Er ist aufgrund seiner bauphysikalischen Eigenschaften aus unserer gebauten Umwelt, unseren Städten und Infrastruktur, nicht mehr wegzudenken. Durch die anpassbare Zusammenstellung einer Betonrezeptur können die bauphysikalischen Eigenschaften des Materials zielorientiert der Aufgabe angepasst werden: Aufgrund seiner hohen Druckfestigkeit und Wasserunlöslichkeit kommt das Material u.a. im Bereich von Fundamenten und erdberührten Bauteilen zum Einsatz. Besonders in diesem Bereich ist Beton kaum durch ein anderes Material zu ersetzen.

Zudem sorgt die hohe Dichte des Materials für einen hohen Schallschutz. In Kombination mit einer Stahlbewehrung kann Beton außerdem enorme Zugkräfte aufnehmen. Der Einsatzbereich im Hochbau reicht von der Deckenplatte eines Einfamilienhauses über Beton-Binder im Hallenbau bis zum aussteifenden Aufzugskern eines Hochhauses. Wo freispannende Bauteile aus Stahlbeton durch ihr Eigengewicht begrenzt sind, finden leistungsfähigere Spannbetonelemente Anwendung. Durch die Verringerung der Dichte kann Beton wärmedämmende Eigenschaften erhalten. Das mineralische Material ist darüber hinaus hinsichtlich seiner Oberfläche vielfältig anpassbar und kommt im sichtbaren Innen- und Außenbereich zum Einsatz. Dabei ist Beton hierzulande aufgrund der einfachen Materialzusammensetzung, der regionalen Verfügbarkeit der Rohstoffe sowie durch das dichte Netz von produzierenden und verarbeitenden Betrieben relativ günstig.

Beton kann als Ort-Beton (Transportbeton) oder in Form von vorproduzierten Fertigteilen zum Einsatz kommen.

Frischbeton wird im plastischen Zustand verarbeitet und mittels Betonmischern vom Transportbetonwerk auf die Baustelle transportiert. Dabei sollten Transportwege und Fahrzeit nicht über 90 Minuten von Ende der Mischung bis zum Einsatz auf der Baustelle betragen, um die gewünschte Qualität zu gewährleisten. Der Beton wird in der Regel mittels Betonpumpen oder Krankübeln in eine Schalung gegossen, die die Form des Bauteils bestimmen. Im Anschluss wird der Beton mittels spezieller Rüttler verdichtet und entlüftet. Um eine optimale Aushärtung zu gewährleisten muss der Beton vor ungewünschten Witterungseinflüssen wie Hitze, Frost oder Regen geschützt werden.

Die Produktbandbreite der im Werk hergestellten Beton-Fertigteilprodukte reicht von Betonsteinen, Fassadenplatten- und Deckenplattenelementen bis zu ganzen „Gebäudebausätzen“ aus Stahlbetonskelettbauanteilen. Die Vorteile von Beton-Fertigteilen sind u.a. die schnelle und damit kostengünstige Montage auf der Baustelle sowie die Verkürzung der Bauzeit durch das Einsparen der Austrocknungszeit im Vergleich zu Ortbeton. Die Verwendung von Beton zeichnet sich darüber hinaus durch einen hohen Standard der Qualitätssicherung aus.

#### **1.2.4 Betonzusammensetzung**

Die Grundrezeptur von Beton besteht aus natürlichen Materialien: Kalkstein, Kies, Sand und Wasser. Darüber hinaus können Betonzusätze hinzugefügt werden, um die Eigenschaften des Betons anzupassen. Zement und Wasser bilden den sogenannten Zementleim, das Bindemittel, welches die Gesteinskörnung und den Sand zusammenhält.

Zement setzt sich zum Großteil aus Kalkstein mit der Zugabe von geraumen Mengen von Ton, Mergel, Sand und Eisenerz zusammen. Zementfabriken sind aus diesem Grund in der Nähe von Kalksteinbrüchen vorzufinden. Die einzelnen Bestandteile werden in feingemahlenem Zustand in Zementöfen bei 1450° zu Zementklinker gesintert. Im Anschluss werden dem Klinker Gips, Anhydrit oder andere Zuschläge beigemischt. Mit Wasser angemacht erhärtet Zement sowohl an der Luft als auch unter Wasser zu Zementstein. Der Aushärtungsprozess basiert auf der chemischen Reaktion der Auskristallisierung, bei der Wasser vom Klinkeranteil im Zement aufgenommen wird. Die dabei entstehenden Calciumsilicathydratphasen (C-S-H) sind Kristallnadeln, die nach und nach mit einander verzahnen und ein festes Kristallgerüst bilden. Bis die endgültige Aushärtung abgeschlossen ist, vergehen Monate. Die DIN 1164 legt fest, dass die Normalfestigkeit unter normalen Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen nach etwa 28 Tagen erreicht wird (vgl. Schulte 2009: 80).

Es kann zwischen den unten aufgeführten Hauptarten von Zement unterschieden werden (vgl. Kind-Barkauskas et al. 2009: 47):

Portlandzement (CEM I)

Portlandhüttenzement (CEM II/A-S, CEM II/B-S)

Portlandpuzzolanzement (CEM II/A-P, CEM II/B-P)

Portlandflugaschezement (CEM II/A-V)

Portlandölschieferzement (CEM II/A-T, CEM II/B-T)



Portlandkalksteinzement (CEM II/A-L)

Portlandflugaschehüttenzement (CEM II/B-SV)

Hochofenzement (CEM III/A, CEM III/B)

Die genaue Zusammensetzung der Zementarten ist genormt. Die dadurch definierten Eigenschaften, wie die Festigkeitsklasse (32,5, 43,5 und 52,5 N/mm<sup>2</sup>) oder die Erhärtungscharakteristik können auf den Herstellerangaben auf der Verpackung (Säcke) nachvollzogen werden.

Das Gesteinskorn stellt mit etwa 86% den größten Anteil der Trockenmasse des Betongemischs dar. Die Gesteinskörnung wird in Korngruppen nach der Größe sowie der Dichte in leichte, normale oder schwere Gesteinskörnung sortiert. Maßgebend für die Festigkeit im Beton ist die Kornzusammensetzung (Sieblinie) unterschiedlicher Korngrößen, die die Dichte der Betonpackung bestimmen. Die Fraktion der Körnung besteht aus einem Gemenge aus ungebrochenen oder gebrochenen Körnern. Das Korn kann entweder aus natürlichen, mineralischen Rohstoffen wie Kies und Schotter, aber auch Eisenerz oder aus aufbereiteten Sekundärrohstoffen mineralischer Abfälle oder industriellen Nebenerzeugnissen wie Schlacke bestehen. Für den Einsatz als Korn sind alle Stoffe geeignet, die eine ausreichende Festigkeit aufweisen, Frost- und Witterungsbeständig sind, einen kraftschlüssigen Verbund mit dem Zementstein eingehen und zu keiner unerwünschten chemischen Reaktion führen, die den Festigungsprozess und die Beständigkeit des Betons negativ beeinflussen können. Die Qualität des Kornes hat großen Einfluss auf die Betoneigenschaften wie Dichte und Festigkeit. So werden beispielsweise für Schwerbetone Zuschläge aus Eisenerz und für Leicht- und Dämmbetone aus Blähton oder Schaumglas verwendet. Zudem prägen die optischen Eigenschaften der Körnung die Oberflächenqualität des Betons.

Zusatzmittel werden dem Beton in geringen Mengen zugegeben und sollen durch eine chemische oder physikalische Wirkung die Betoneigenschaften im flüssigen oder ausgehärteten Zustand verbessern. Die Zusatzmittel können dem Beton im flüssigen bis pulverförmigen Zustand zugefügt werden. Wichtig dabei ist eine gleichmäßige Verteilung im Betongemisch. Voraussetzung für den Einsatz als Zusatzmittel sind Stoffe, die betonverträglich sind und die Beständigkeit der Bewehrung nicht negativ beeinträchtigen. Die Zusatzmittel haben vielseitige Auswirkungen auf den Beton: Beispielsweise können sie die Erhärtung verzögern oder beschleunigen, die Dichte erhöhen oder durch Porenbildung verringern, das Gemisch verflüssigen oder eine Stabilisierung bewirken.

Betonzusatzstoffe können dem Gemisch in größeren Mengen zugefügt werden, um die Eigenschaften des Betons zu beeinflussen. Sie werden in zwei Arten unterschieden.

Typ I: Zusatzstoffe, die nahezu keine chemische oder physikalische Wirkung auf den Beton haben. Dazu zählen Gesteinsmehle oder Pigmente, die beispielsweise zur Einfärbung des Betons eingesetzt werden.

Typ II: Zusatzstoffe mit puzzolanischen Eigenschaften können künstlich hergestellt sein, wie Flugasche oder in der Natur in Form von Trass vorzufinden sein. Sie bilden unter der Zugabe von Wasser und Kalkhydrat die gleichen Kristallstrukturen wie Zement. Dadurch wird das Gemisch zu einem festen Kunststein. Die Römer verwendeten Puzzolane aus Vulkangestein als Bindemittel für die Herstellung von Beton.

Darüber hinaus werden die Festigkeit und die bauphysikalischen Eigenschaften des Betons durch den Grad der Verdichtung (Luftgehalt), die Nachbehandlung und das mengenmäßige Verhältnis zwischen Wasser und Zement (WZ-Wert) bestimmt. Alle Bestandteile der Betonrezeptur werden genau berechnet und exakt aufeinander abgestimmt, um die zielorientierten Anforderungen der verschiedenen Betonarten (Leichtbeton, Normalbeton, Schwerbeton) erfüllen zu können (vgl. Kind-Barcauskas et al. 2009: 47-50).

Stahl ist das älteste und gängigste Material für die Bewehrung im Beton. Der Stahlanteil macht zwar nur einen geringen Anteil des Betonvolumens aus, hat aber große Auswirkung auf die Steigerung der Tragfähigkeit eines Betonbauteils. Die Stahlbewehrung wird in Form von Matten, Körben und

Stäben in den Beton einbetoniert. Der kraftschlüssige Verbund zwischen Beton und den Armierungsstahl wird durch Rippen und eine Profilierung der Bewehrungsstäbe hergestellt. Dabei ummantelt der Beton den Stahl und schützt ihn vor äußeren Einflüssen wie Feuer und Witterung.

### 1.2.5 Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität von Beton und Stahlbetonbauteilen wird maßgeblich durch die Schalung und die Betonzusammensetzung geprägt. In plastischer Konsistenz verarbeitet, nimmt der Beton nach der Aushärtung jede beliebige Form an. Dabei passt sich der Beton nicht nur der Geometrie der Schalung an, sondern auch die Schalungsoberfläche ist als Negativ nach der Ausschalung auf der Betonoberfläche ablesbar. Neben den Flächen fallen die Stöße der Schaltafелеlemente auf, die das Raster des Schalungssystems widerspiegeln. Die Schaltafeln können beispielsweise aus großformatigen Holz-, Stahl- oder Kunststoffplatten oder kleinteiligen Elementen wie Brettern bestehen. Die Farbigkeit der Betonoberfläche wird zudem durch die Zusammensetzung des Zements und die Farbe und Struktur der Gesteinskörnung definiert. Zudem besteht die Möglichkeit den Beton durch die Zugabe von Farbpigmenten beliebig durchzufärben. Darüber hinaus kann die Oberfläche nach dem Ausschalen beliebig mechanisch (handwerklich gemäß steinmetzmäßigen Bearbeitungstechniken, Polieren, Bürsten, Schleifen u.a.) oder technisch (Strahlen, Auswaschen, Behandlung mit Säure u.a.) nachbearbeitet werden.

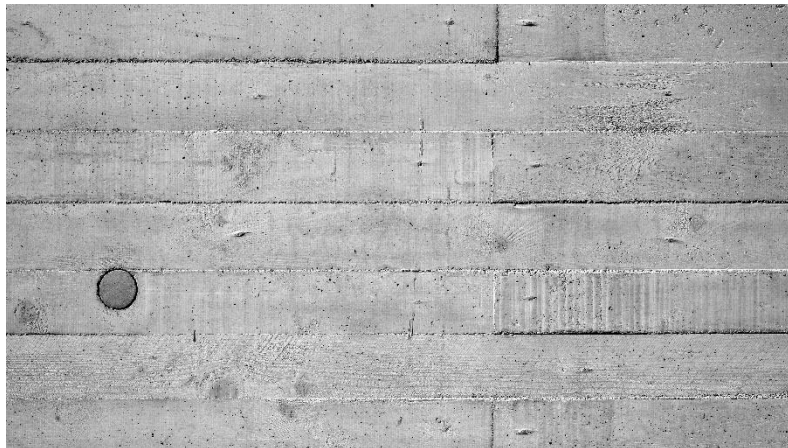


Abbildung A1.25: Schalungsstruktur in Sichtbeton  
[HeidelbergCement AG / Steffen Fuchs]

### 1.2.6 Auswirkung auf das Raumklima

Beton hat aufgrund seiner Wärmespeicherfähigkeit die bauphysikalische Eigenschaft, Temperaturspitzen ausgleichen zu können indem überschüssige Wärme zwischengespeichert wird, bevor es zu einer Überhitzung im Innenraum kommt. Bei einer nächtlichen Absenkung der Temperaturen wird die Wärme wieder an die Außenluft abgegeben. Aus diesem Grund bietet eine massive Bauweise in Beton sowohl einen hohen sommerlichen Wärmeschutz als auch Schutz vor einer nächtlichen Auskühlung während der Heizperiode.

### 1.2.7 Umweltverträglichkeit

#### 1.2.7.1 Klima

Die Betonproduktion in Deutschland ist für ca. 2% und weltweit für etwa 8% des vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verantwortlich (vgl. Beyond Zero Emissions (Hrsg.) 2017: 7). Die klimaschädlichen Treibhausgase werden bei der Produktion von Zementklinker auf zwei Wegen freigesetzt. Zum einen durch die Erzeugung der hohen Temperaturen des Brennprozesses im

Zementofen. Hierbei kommt es zu einem hohen Brennstoffverbrauch und somit zu einem energiebedingten CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Darüber hinaus entsteht ein großer Teil der Emissionen bei der Entsäuerung des Zementklinkers, die während des Brennprozess stattfindet. Dabei reagiert das Calciumcarbonat des Kalksteins zu Calciumoxid und gibt Kohlendioxid ab.

Weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette von Zementprodukten. Durch die Addition dieser Emissionen entsteht ein durchschnittliches globales Erwärmungspotential von 587kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Tonne in Deutschland hergestellten Zement (vgl. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.) 2017). Dieser Wert ist zwar niedriger als der von Stahl oder Aluminium, jedoch ist Zement quantitativ mit Abstand das meistverwendete Material, sodass die Gesamtmenge und die damit einhergehenden Treibhausgasemissionen als besonders problematisch zu betrachten sind.

Bei der gesamtheitlichen Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Bilanz, darf der Aspekt der Karbonatisierung nicht unerwähnt bleiben. Während des Alterungsprozesses absorbieren Zementprodukte Kohlenstoffdioxid aus der Luft. Zementprodukte mit einer großen Oberfläche, wie dünnaufgetragener Mörtel aber auch recycelter Betonsplitt, haben einen relativ großen Luftkontakt und absorbieren dadurch schneller und mehr Kohlendioxid als beispielsweise massive Betonbauteile. Die stattfindende Bindung von Kohlendioxid aus der Luft im Zementstein kann als negatives Treibhauspotenzial bezeichnet werden (vgl. Hahn 2016).

Beton ist aufgrund seiner bauphysikalischen Eigenschaften unverzichtbar und stellt daher den Großteil der verbauten Materialien in unseren Städten und unserer Infrastruktur dar. Der Bedarf soll aufgrund des Bevölkerungswachstums und dem damit einhergehenden Wachsen der Städte weltweit steigen. In Deutschland wird ein schwacher Rücklauf oder eine Stagnation erwartet, trotz allem bleibt die Nachfrage hoch (vgl. WWF (Hrsg.)2019: 7-10). In Anbetracht dieser Entwicklung wird die Dringlichkeit von Klimaschutzmaßnahmen durch die Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-reduzierten und massentauglichen Betonrezeptur deutlich.

### **1.2.7.2 Ressourcenverbrauch**

Als wesentlicher Bestandteil von Beton, stellt Sand nach Wasser, die häufigst verbrauchte Ressource dar. Die Bauindustrie und speziell die Betonindustrie verursacht bereits heute eine Verknappung des Rohstoffs. Auf dem ersten Blick scheint es genug Sand auf der Welt, besonders in Form von Wüstensand, zu geben. Der Schein trügt, denn Sand ist nicht gleich Sand. 95% der Sandvorkommen sind aufgrund einer runden und glatten Korngemetrie nicht für die Betonherstellung geeignet. Die glatten Körner des Feinsandes besitzen nicht die Eigenschaft, sich zu verhaken, um so einen kraftschlüssigen Verbund in der Betonmatrix zu erzeugen.

Länder, denen geeigneter Bausand fehlt oder deren konventionelle Rohstoffquellen erschöpft sind, beziehen den Rohstoff zunehmend aus dem Meer, von Küsten, Flüssen und Seen. Dabei führt der Sandabbau durch den Eingriff in sensible Ökosystemen zu enormen Umweltschäden. Zudem wird Sand zum globalen Exportgut, dessen Transport wiederum energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. So wurde beispielhaft der Sand für das Burj Khalifa (Dubai, 2004-2010) aus Australien importiert.

Das Material war lange günstig und galt als unerschöpflich. Beide Vorstellungen haben sich geändert. Auch in Deutschland werden die Rohstoffe Sand und Kies knapp. Zwar gibt es große Sand- und Kiesvorkommen in Deutschland, jedoch liegen diese häufig in Naturschutzgebieten oder unter Wohn- oder Gewerbegebieten und sind nur schwer zugänglich. Die Erschließung von neuen primären Rohstoffquellen führt in der Regel zu Flächennutzungskonflikten und ist mit erheblichen Eingriffen in die Umwelt und aufgrund des steigenden Aufwands mit hohen Kosten verbunden.

## 1.2.8 Ökologische Optimierungsmöglichkeiten

Um die geplanten Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen, die Erderwärmung unter der 2°C-Grenze zu halten und Deutschland klimaneutral zu machen, besteht dringender Handlungsbedarf zur Dekarbonisierung in der Industrie und insbesondere in der Beton- und Zementproduktion. Deutschland muss an dieser Stelle aus mehreren Gründen eine Vorreiterrolle im nachhaltigen Umgang mit Beton einnehmen. Mit Blick auf die deutlich größeren global verursachten Emissionen durch die Betonproduktion sowie einen weltweit steigenden Bedarf des Materials werden die Dringlichkeit und Relevanz besonders deutlich. Darüber hinaus exportiert Deutschland einen nicht unerheblichen Teil des produzierten Zements und Betons und sollte daher großes Interesse daran haben, innovative und nachhaltige Produkte in diesem Bereich zu entwickeln. Mit den technischen Möglichkeiten und dem Knowhow der Entwicklung „grünen“ Zements und Betons hat Deutschland die Chance, wirtschaftlich zu profitieren, Wissen zu teilen und Einfluss auf die internationale Entwicklung dieser Branche zu nehmen.

Der Abbau der Rohstoffe Kalk, Sand und Kies führt zu massiven Umweltschäden, Verlust an Biodiversität und einem hohen Flächenverbrauch. Auch in diesem Bereich besteht Handlungsbedarf zu einer nachhaltigen Produktion und der Förderung von Alternativen in Form von Recyclingmaterialien.

Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze vorgestellt, wie der Einsatz von Zement und Beton ökologisch nachhaltiger gestaltet werden kann:

### 1.2.8.1 Volumenreduktion

Die Idee, das Eigengewicht von massiven Betonbauteilen durch die Ausbildung von Kassetten und den Einbau von Hohlkörpern und Luftkammern zu verringern, entstand bereits zur Zeit der römischen Antike (vgl. Kap. 1.2.2). Während die Römer die Dichte aus konstruktiven Gründen reduziert haben, ist es heute eine Möglichkeit, Zement und damit CO<sub>2</sub> einzusparen.

Einer der ersten Hersteller von Hohlkammerdecken war Cobiax, der das neuartige Deckensystem Ende der 1990er Jahre etablieren konnte. Die Hohlkörper (ca. 400g Eigengewicht) bestehen aus Recyclingkunststoff, können kugel- oder ovalförmig geformt sein und ersetzen etwa ein Drittel des Volumens einer Stahlbetondecke. Dabei ersetzen die Verdrängungskörper Beton in den Bereichen, in denen er nicht für die Tragfähigkeit der Konstruktion erforderlich ist. Die Hohlkörper werden vor dem Einbetonieren an den der Stahlbewehrung fixiert und anschließend mit Frischbeton eingegossen. Die Reduktion des Betonvolumens bewirkt den Einsatz von 5-20% weniger Bewehrungsstahl und erhöht gleichzeitig die Tragfähigkeit bei relativ geringen Bauteildicken.



Abbildung A1.26: Hohlkörper in Betondecke  
[Heinze Cobiax Deutschland GmbH]

Ein weiteres gängiges Bausystem sind hohle Beton-Fertigdecken. Die großformatigen Deckenbauteile werden im Werk vorgefertigt und können auf der Baustelle schnell und einfach montiert werden. Die durchgehenden, röhrenförmigen Hohlkörper sorgen für eine deutliche Reduzierung des Eigengewichts und bewirken eine Steigerung der Tragfähigkeit bei gleichen Querschnittsabmessungen. Hohlkörpersteine stellen eine weitere Möglichkeit dar, mit Fertigteilen eine relativ leichte Betondecke herzustellen. Diese Konstruktion kommt aufgrund der einfachen Montage überwiegend in Altbauten zum Einsatz. Die Deckensteine werden zwischen Beton-Gitterträger oder Stahlträgern eingehängt und im Anschluss am Fußpunkt mit Frischbeton vergossen. Die Gewichtsreduktion von Deckensystemen wirkt sich zudem positiv auf angrenzende Bauteile aus, die weniger Lasten zu tragen haben, somit filigraner dimensioniert sind und dadurch Material eingespart werden kann.

Die Kassettendecke besteht aus Stahlbetonrippen, die rechtwinklig zueinander in zwei Richtungen verlaufen und kraftschlüssig mit einer Deckenplatte verbunden sind. Dadurch entstehen zwischen den Rippen rechteckige oder quadratische Felder. Aufgrund der optischen Qualitäten dieser Konstruktion, kommt die Kassettendecke häufig im sichtbaren Bereich zur Anwendung. Darüber hinaus sind Kassettendecken besonders für schwer belastete Decken und große Spannweiten geeignet. Die Kassettierung der Decke reduziert das Eigengewicht und somit den Zementanteil des Bauteils und erhöht gleichzeitig die Tragfähigkeit.

### 1.2.8.2 Ökozement

Das Prinzip „Ökozement“ basiert darauf, den Klinkeranteil, der im in Portlandzement 95-100% ausmacht und überwiegend für die klimaschädlichen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist, zu reduzieren oder wenn möglich gänzlich zu ersetzen, um so die Umweltbelastungen zu reduzieren.

Durch die Reduktion des Wasseranteils, die Verwendung eines Hochleistungsfließmittels sowie die Erhöhung des Kalksteinmehlanteils kann die Reduktion des Anteils von Portlandzementklinker erreicht werden. Dadurch können 30 bis 60% der Treibhausgasemissionen eingespart werden (vgl. TUD Institut für Massivbau (Hrsg.) o.J.).

Als ein weiterer vielversprechender Ansatz gilt die Substitution von Klinker durch Magnesiumbasiertem Zement. Die Zementrezeptur benötigt nur eine etwa halb so hohe Sintertemperatur wie Klinker und hat zudem das Potential, mehr CO<sub>2</sub> im Verlauf des Aushärtungsprozess aufnehmen zu können

als durch die Produktion emittiert wurde. Somit würde das Material eine negative CO<sub>2</sub>-Bilanz aufweisen und vom *Klimakiller* zum *Klimaretter* mutieren. Jedoch benötigt der Aushärtungsprozess mehr als ein Jahr und ist daher aktuell noch ungeeignet (vgl. Schulte 2009: 80).

Im Rohstoffgemisch von CSA-Zement ist ein großer Teil von Kalkstein durch Calciumsulfoaluminat ersetzt. Dadurch werden die Treibhausgasemissionen eingespart, die bei der chemischen Reaktion im Brennprozess von Kalkstein (Entsäuerung) verursacht werden. Darüber hinaus lässt sich mit der Verwendung von Calciumsulfoaluminat die Sintertemperatur um 200°C senken und somit der Ausstoß von Kohlendioxid um 200 Kilogramm reduzieren (vgl. Six 2020).

### **1.2.8.3 Industrielle Abfallstoffe als Betonzuschlag**

Bei industriellen Produktionsprozessen entstehen große Mengen an Aschen und Schlacken als Nebenprodukte. Diese Stoffe stellen keinen „Abfall“ dar, sondern können als Zuschlagstoffe im Bauwesen eingesetzt werden. Die Rückstände entstehen bei der Verbrennung von organischen Materialien wie Kohle, Erdöl und auch Holz. Sie sind im Wesentlichen mineralisch, nicht brennbar und haben eine feinkörnige (Asche), pulverförmige (Staub) oder zähflüssiger (Schlacke) Konsistenz.

Neben der Anwendung im Straßen-, Wege und Erdbau, kommen Rückstände aus der kohle- und metallverarbeitenden Industrie als Zuschläge für Beton und Zement zum Einsatz. Die Verbrennungsrückstände aus der Stahlindustrie werden in Form von Hüttensand in der Zementindustrie verarbeitet. Die grobkörnigen Rückstände aus der Steinkohleindustrie werden als Kesselsand bezeichnet. Dieses Nebenprodukt kann in der Betonindustrie als Leichtzuschlag verwendet werden.

Als Zementersatz können bestimmte Flugaschen aus der Braunkohleindustrie eingesetzt werden. Die Zusammensetzung und die daraus resultierenden chemischen Reaktionen der Flugasche werden maßgeblich durch die Art und Herkunft der Asche und die Verbrennungsbedingungen definiert. In der Regel verfügt Braunkohleasche über hydraulische Eigenschaften, also die Fähigkeit unter Wasserzugabe zu erhärten. Sie kann ähnlich wie Zement eingesetzt werden. Des Weiteren haben einige Flugaschen puzzolanische Eigenschaften, die sich positiv auf die Gefügeverdichtung des Betons auswirken können. Ein Großteil (3 Mio. Tonnen) der produzierten Braunkohleasche (3,85 Mio. Tonnen) findet nach Angaben des Wirtschaftsverband Mineralische Nebenprodukte e.V. bereits in der Betonindustrie Anwendung (vgl. WIN (Hrsg.) o.J.). Dabei kann der Mengenanteil der Flugasche den teureren Portlandzement bis zu 35% ersetzen. Das macht den Zement nicht nur günstiger, sondern aufgrund des verringerten Kalksteinanteils klimafreundlicher.

### **1.2.8.4 „Microfüller“**

Die TU Graz hat einen Beton entwickelt, der 30 Prozent weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die anteilige Substitution des Portlandzements durch sogenannte „Microfüller“ aus regional verfügbarem Gesteinsmehl verursacht. Das sehr fein ausgemahlene Steinmehl hat die Funktion, die Packungsdichte der Mischung zu erhöhen. Dabei nehmen die feinen Körner die Hohlräume, die bei normalem Beton mit Wasser gefüllt sind ein, erhöhen dadurch die Dichte und senken den Wasseranteil. Das führte dazu, dass weitere Gesteinsmehle oder ausgemahlener Hüttensand (Nebenerzeugnis aus der Industrie) der Mischung hinzugefügt werden können. Ein weiterer Vorteil bestehe darin, dass verschiedene lokal verfügbare Gesteine zum Einsatz kommen können und dadurch Transportkosten und Emissionen reduziert werden können. Dabei weist dieser Ökobeton die gleichen Festigkeiten und Aushärtungsgeschwindigkeiten wie normaler Beton auf (vgl. Eigner 2016).

### **1.2.9 Recycling**

Betonabbruch wird der Abfallgruppe der mineralischen Abfälle zugeordnet. Diese Stoffgruppe stellt mit insgesamt 214,6 Mio. Tonnen pro Jahr (2016) mengenmäßig die größte Abfallfraktion in

Deutschland dar. Sie setzt sich aus Bauschutt, Straßenabbruch, Baustellenabfällen und Bodenaushüben zusammen. Der Großteil der Fraktion Bauschutt, welche mit 58,5 Mio. Tonnen pro Jahr (2016) 27% der Gesamtmenge der mineralischen Abfälle ausmacht, besteht aus Beton- und Mauerwerksbruch (vgl. Bundesumweltamt (Hrsg.) o.J.)

Aufgrund des großen Betonvorkommens in der anthropogenen Umwelt und der steigenden Nachfrage ist mit einem vermehrten zukünftigen Abfallaufkommen aus dieser Fraktion zu rechnen. In Anbetracht dessen und den bereits beschriebenen negativen Auswirkungen für die Umwelt verursacht durch den Ressourcenabbau, langfristig steigenden Rohstoffkosten sowie knapper werdenden Deponieflächen, kommt der Gewinnung hochwertiger Sekundärrohstoffe für die Herstellung von Frischbeton eine besondere Bedeutung zu.

Der Einsatz von Gesteinskörnung aus einer Beton-Recycling-Quelle für Frischbeton liegt in Deutschland aktuell bei ca. 0,5%. In der EU beträgt dieser Wert etwa 6%. Der größte Anwendungsbereich von zerkleinertem Bauschutt liegt im Tiefbau beim Straßenbau, Frostschutzschichten und Schüttgut. Zwar ersetzt das Rezyklat auch bei dieser Anwendung den Einsatz von Primärrohstoffen, jedoch kommt es zu einem Downcyclingprozess, da ein nicht unerheblicher Anteil des recycelten Abbruchmaterials die Qualität aufweist, eine zweite Anwendung als Gesteinskörnung in Beton zu finden. Ziel ist es daher, einen möglichst geschlossenen Rohstoffkreislauf im Bereich Hochbau zu gewährleisten. Dazu soll die Gesteinskörnung von Beton aus Rückbaumaßnahmen zurückgewonnen und als Rezyklat der Betonproduktion zurückgeführt werden. Die Qualität der Kornzusammensetzung bestimmt dabei die Güte und Eigenschaften des Recyclingbetons. In diesem Rahmen ist der Einsatz von Rezyklaten aus beispielsweise Mauerwerksbruch grundsätzlich möglich. Der Anteil der Recycling-Gesteinskörnung ist gemäß den DAfSbt-Richtlinien (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton) in Deutschland auf 45% begrenzt und darf bei Betonen einer Festigkeitsklasse bis C 30/37 Anwendung finden. Versuche in der Schweiz konnten nachweisen, dass qualitativ hochwertiger Beton hergestellt werden konnte, der einen deutlich höheren Kornanteil aus einer Recyclingquelle besaß.

Das Bindemittel Zement und Zusatzstoffe sind nicht durch Rezyklate aus Betonbruch zu ersetzen und stammen daher in der Regel aus primären Rohstoffquellen. Das bedeutet, dass der ökologische Fußabdruck von RC-Beton, der maßgeblich durch den Zement beeinflusst wird, nicht besser ausfällt.

Die Aufbereitung von Betonbruch verfolgten im Wesentlichen das Ziel, das Abbruchmaterial von Störstoffen zu trennen, in verschiedenen Schritten zu zerkleinern und das gewonnene Korn nach Größe und Qualität zu klassieren. Im Zerkleinerungsprozess entsteht grobes Korn und eine feinkörnige Fraktion. Für den Einsatz als Frischbeton ist das grobe und eckige Korn gemäß der Sieblinie am besten geeignet. Gebrochenes Korn kann rundes Korn zu Teilen in der Betonmatrix ersetzen, bildet jedoch Hohlräume und benötigt daher mehr Zement oder den Einsatz von Betonverflüssiger. Dies muss bei der Mischung und Herstellung der Betonrezeptur berücksichtigt werden.

Um Beton-Rezyklat möglichst rohstoffeffizient nutzen zu können, verfolgt die Forschung das Ziel, die Betonmatrix in seine Bestandteile Zementstein und runden Kies zu zerlegen. Dies gelang bereits in aufwendigen Versuchen durch eine elektrodynamische und elektrohydraulische Fragmentierung. Die Umsetzung dieser Technik im großen Maßstab ist in naher Zukunft jedoch nicht zu erwarten. Darüber hinaus zeigen weitere Untersuchungen, dass die feinen Kornfraktionen (Betonbrechsand), die einen großen Teil des Betonrecyclings ausmachen und lange für die Produktion von Frischbeton als unbrauchbar galten, als Sekundärrohstoff der Zementproduktion zurückgeführt werden können (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 70).

Die Wirtschaftlichkeit von Recyclingbeton misst sich unter anderem an den Transportkosten der Sekundärrohstoffe. Daher sollten die Wege zwischen Abbruchgebäude, Ort der Aufbereitung und neuem Einsatzort möglichst gering ausfallen. Im Optimalfall finden das Recycling des Abbruchmaterials und die Herstellung von RC-Beton direkt auf der Baustelle statt. Dies ist eine Möglichkeit die Ökobilanz des vor Ort genutzten Rezyklats durch das Einsparen der Transportenergie im Vergleich

zu konventionellen Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen zu verbessern. Der Energieverbrauch, der durch die Produktion der Gesteinskörnung aus einer primären oder sekundären Rohstoffquelle, verursacht wird, kann aufgrund von ähnlichen Arbeitsmethoden, wie dem Einsatz von schweren Maschinen, als vergleichbar eingestuft werden. Unterschiede ergeben sich durch die regionale Infrastruktur, kurze Transportwege und moderne Anlagentechnik.

Das Recycling in Form einer Wiederverwendung von Betonelementen und Bauteilen stellt aufgrund des Transportaufwands und einem aufwendigen Rückbau lediglich eine Ausnahme dar. Die konventionelle Bauweise aus Frisch- und Ortbeton der tragenden Elemente wie Fundament, Geschossdecken und Wände macht auf Grund der unlösbaren Verbindungen eine Wiederverwendung oft nicht möglich. Eine Ausnahme stellt der selektive Rückbau von Betonfertigbauteilen wie Fassadenplatten, Außenwänden und Deckenplatten, beispielsweise aus Plattenbauten, dar.

Durch den Einsatz von Rezyklaten als partiellem Ersatz der Gesteinskörnung in Recyclingbeton kann der Abbau von Primärrohstoffen vermieden und damit Natur und Ökosysteme geschont werden. Trotz der Tatsache, dass die Ressourcen Sand und Kies in großen Teilen Deutschlands ausreichend vorhanden sind, kann an dieser Stelle auch auf Regionen verwiesen werden, in denen ganze Küstenregionen und Inseln abgegraben werden, um Sand für die Betonherstellung zu gewinnen.

Deutschland kann also eine Vorreiterrolle einnehmen und als gutes Vorbild in Sachen Betonrecycling und Ressourcenschonung vorangehen.

#### **1.2.9.1 Recycling-Sand**

Das Münchener Unternehmen Multicon hat ein Verfahren patentieren lassen, wie Wüstensand für die Betonproduktion aufbereitet werden kann. Dabei wird der Wüstensand gemahlen und zu einem Steinmehl verarbeitet, das mit einem mineralischen Bindemittel zu Pellets, verschiedener Korngrößen, verarbeitet wird. Die Pellets werden mit Zement und Wasser sowie weiteren Zuschlägen in einem Hochgeschwindigkeitsmischer verarbeitet. Das Anmischen bei einer deutlich höheren Geschwindigkeit als bei der konventioneller Betonherstellung führt dazu, dass die „Reaktionsbereitschaft“ des Zements erhöht und dadurch der Zementanteil im Beton gesenkt werden kann. Dadurch kann der ökologische Fußabdruck des Materialgemisches verkleinert werden. Zudem weist der Beton eine höhere Druckfestigkeit und geringere Trocknungszeit im Vergleich zu konventionellem Beton auf. Mit dieser Technik besteht das Potential die feinkörnigen Bestandteile, die bei der Aufbereitung von Altbeton und Bauschutt zu Recyclingbeton entstehen und bisher als unbrauchbares Nebenprodukt galten, wieder in den Materialkreislauf aufzunehmen (vgl. Grimm 2019).

Darüber hinaus hat die deutsche Firma Polycare ein Verfahren entwickelt bei dem gemahlener Wüstensand mit einem schnell abbindenden Bindemittel zu Betonsteinen gepresst werden kann. Die Steine aus sogenannten Polymerbeton werden wie Legosteine geformt und können daher einfacher auf der Baustelle montiert werden. Zudem haben die Formlinge aus Beton eine höhere Druck- und Zugfestigkeit, eine sehr geringe Aushärtungszeit und einen reduzierten Zementanteil als normaler Beton. Damit hat das Verfahren ähnliche ökologische Vorzüge wie der zuvor beschriebene neuartige Beton von Multicon (vgl. Polycare (Hrsg.) o.J.).

#### **1.2.10 Fazit**

Die Frage, ob der Einsatz von Beton im nachhaltigen Museum unter ökologischen und ressourcenschonenden Gesichtspunkten vertretbar ist, kann nicht eindeutig beantwortet werden. Aus einem rein ökologischen Blickwinkel besteht aktuell noch nicht die Möglichkeit, (Öko-)Beton maßgeblich umwelt- und klimafreundlich herzustellen. Es gibt aber die Möglichkeit, einen Teil der produktions-



bedingten Emissionen einzusparen und einen Teil der Rohstoffe durch Recyclingprodukte zu ersetzen. Auf der anderen Seite ist Beton für eine Vielzahl von Einsatzbereichen im geplanten Museumsneubau sowie im Bauwesen im Allgemeinen unverzichtbar. Aufgrund dieser Tatsache ist es zwingend notwendig den Paradigmenwechsel im Umgang mit Beton voranzutreiben und eine Vorbildfunktion im Umgang mit Beton einzunehmen. Die vorangehende Analyse hat gezeigt, dass es verschiedene Stellschrauben gibt, den ökologischen Fußabdruck von Beton zu verringern und das Material ressourcenschonender einzusetzen. Mit der richtigen Auswahl der zurzeit zur Verfügung stehenden Möglichkeiten, kann das Material bestmöglich optimiert und richtungsweisend für den nachhaltigen Einsatz von Beton im großmaßstäblichen Museumsbau eingesetzt werden.

## 1.3 Lehm

### 1.3.1 Einleitung

Lehm ist ein natürlicher Baustoff, der durch Zersetzung von Urgestein entsteht. Er besteht aus Sand und Schluff sowie Ton, welche für die Bindefähigkeit verantwortlich sind (vgl. Schroeder 2019: 141). Zu geringeren Teilen können auch Kies und Steine enthalten sein. Lehm ist im feuchten Zustand formbar und im trockenen Zustand fest.

Das Naturmaterial weist global eine hohe Verfügbarkeit auf und kann sehr einfach abgebaut und verarbeitet werden, wodurch es bereits seit etwa 10.000 Jahren als Baustoff Verwendung findet und bis heute in vielen Kulturkreisen einen der wichtigsten Baustoffe darstellt. Es wird in Form von Stampflehm, Lehmsteinen oder Lehmputz verarbeitet und kann durch Zugabe von Wasser beliebig häufig erneut formbar gemacht und wiederverwendet werden.

Verarbeiteter Lehm ist schadstofffrei, speichert Wärme und reguliert die relative Raumluftfeuchte, was zu einem angenehmen und gesunden Raumklima beiträgt.

Die Eigenschaften des Materials können an die jeweilige Aufgabe durch die Zugabe von Zusatzmitteln und -stoffen angepasst werden. Er kann im Innen- wie auch, unter Berücksichtigung eines Witterungsschutzes, im Außenbereich, sowie als tragendes und nicht tragendes Bauteil eingesetzt werden.

In Anbetracht der vielen Vorteile von Lehm erscheint es schwer nachvollziehbar, warum der Baustoff in der Architektur Europas in den letzten Jahrhunderten keine präzisere Rolle einnimmt. Daher stellt sich die Frage, inwiefern Lehm im zeitgenössischen Hochbau im Allgemeinen und im Museumsbau im Besonderen unter ökologischen, bauphysikalischen und baukonstruktiven Gesichtspunkten als repräsentativer Baustoff (wieder) Anwendung finden kann.

### 1.3.2 Historischer Überblick: Baustoff Lehm in Deutschland

In Deutschland konnten Gebäude aus der Jungsteinzeit archäologisch rekonstruiert werden, welche durch die Sesshaftwerdung erstmals unter Zuhilfenahme des lokalen Rohstoffes Lehm hergestellt wurden. Das Bauprinzip der frühen Holzständerbauten basierte auf vertikalen Pfosten mit Flechtwerk aus Ästen und Zweigen, das mit Strohlehm ausgekleidet und geschlossen wurde. Diese archetypische Bauweise wurde im Laufe der Jahrhunderte zur Fachwerkbauweise weiterentwickelt, welche in regional unterschiedlichen Ausprägungen noch heute mancherorts das Erscheinungsbild des ländlichen und urbanen Raums prägt.

Das vermutlich älteste Beispiel für ein Gebäude in tragender Lehmsteinbauweise nördlich der Alpen stammt aus der Zeit um ca. 500 v.Chr. In anderen Kulturkreisen wurde tragender Lehmstein schon deutlich früher verarbeitet.

Im Verlauf des 9. Jahrhunderts wird der tragende Stampflehmbau in Mitteldeutschland als Wellerlehmbauweise bekannt. Im Vergleich zu der heute gängigen Stampflehmhausbauweise, ist die Wellerlehmbauweise nicht schalungsgebunden und enthält Stroh als Zusatzstoff.

Durch eine Holzknappheit im 12. und 13. Jahrhundert erfährt der Lehmhausbau einen erneuten Entwicklungsschub. So kann sich mit der Wende zum 19. Jahrhundert der schalungsgebundene Stampflehmhausbau in Deutschland etablieren. Jedoch sollte diese Bauweise nicht lange Bestand haben. Durch die Industrialisierung und die damit einhergehenden Neuerungen in der Baustoffindustrie verliert Lehm als Baustoff seine Bedeutung. Industrieerzeugnisse wie Ziegelsteine, Zement und Beton nehmen den Platz von Lehmbaustoffen nach und nach ein, da sie witterungsbeständiger und belastbarer bei geringerer Dimensionierung sind. Erst während und nach den beiden Weltkriegen gewinnt

Lehm aufgrund des Einbruchs der industriellen Baustoffproduktion für kurze Zeit wieder an Bedeutung. In der DDR hielt dieser Trend bis in die 1960er Jahre an. Der Lehmbau wurde dort gefördert und konnte einen hohen technologischen Standard erreichen.

Seit den 1980er Jahren ist eine zögerliche Rückkehr zum kulturellen Erbe des Lehmbaus zu verzeichnen. Dank der Entwicklung neuer Lehmbaustoffe und Produkte sowie der Optimierung der Verarbeitungstechniken ist der Baustoff heute vielseitig im Innen- und Außenraum, als tragend und nicht-tragend Bauteil einsetzbar. Lehm ist aufgrund der großen Verfügbarkeit, der energiearmen Herstellung und Verarbeitbarkeit, der einfachen Wiederverwendbarkeit sowie des positiven Effekts auf das Raumklima besonders im Bereich des energiesparenden, nachhaltigen und ressourcenschonenden Bauen beliebt (vgl. Schroeder 2019: 12-22).

### 1.3.3 Eigenschaften von Baulehm

Ob sich ein Rohlehm als Baulehm eignet, hängt von der Kornzusammensetzung (Geschiebelehm, Lösslehm) sowie dem Verhältnis von Korn zu Tonmineralanteil ab. Dieses Verhältnis bestimmt die Bindekraft des Baulehms. Jeder Lehm Boden ist ein Unikat und variiert je nach Lagerstätte, die wiederum strukturelle Unterschiede aufweisen kann. Hinzu kommen natürliche Beimischungen, wie Hummus und Wurzelwerk, die für eine Verwendung als Baulehm möglichst entfernt werden müssen. Die lokale Ressource bestimmt die Rahmenbedingungen der Verwendung und weiteren Aufarbeitung zum Baulehm (vgl. Rauch 2015: 65). Ein *magerer* Lehm ist verhältnismäßig tonarm und weist eine geringe Bindekraft auf. Tonreiche Lehme werden als *fett* bezeichnet und haben eine höhere Bindekraft. Des Weiteren ist die Kornzusammensetzung, die *Körnungslinie*, entscheidend für die Festigkeit des Lehms.

Die Körnungslinie beschreibt die Korngrößenzusammensetzung von Baulehm und ist ein wichtiger Indikator für die Verarbeitung und die bautechnischen Eigenschaften hinsichtlich der Verdichtbarkeit, Belastbarkeit und des Erosionsverhaltens. Die Zusammensetzung aus verschiedenen Korngrößen (*ungleichförmige Körnung*) führt zu einer höheren Druckfestigkeit bei der Herstellung von Stampflehm als bei überwiegend gleichgroßem Kornanteil. Dies ist auf den Herstellungsprozess zurückzuführen, bei dem durch die Verdichtung des Lehms kleinere Körnungen die Räume zwischen größeren Korngrößen ausfüllen, sodass der Hohlraumanteil minimiert und dadurch mit steigender Dichte auch die Druckfestigkeit erhöht wird. Im Gegensatz zur Druckfestigkeit, sind Lehmbaustoffe jedoch nur bedingt auf Zug- und Scherkräfte belastbar. Die Zusammensetzung der Korngrößen variiert je nach Anwendungsbereich. Für die Herstellung von Stampflehm ist beispielsweise ein hoher Kiesanteil und für Lehmputz ein hoher Sandanteil erforderlich (vgl. Schroeder 2019: 94). Lehm besitzt besondere hygri sche Eigenschaften. Durch die Sorptionsfähigkeit der Tonmineralien, trägt das Material einen wertvollen Beitrag zur Regulierung und Stabilisierung der raumklimatischen Bedingungen bei und bindet Schadstoffe und Gerüche aus der Raumluft. Die Fähigkeit, Luftfeuchte schnell aufzunehmen und zeitversetzt wieder abzugeben, hat einen positiven Effekt auf das Behaglichkeitsempfinden und die Klimakonstanz im Innenraum und wirkt präventiv der Schimmelbildung entgegen. Aufgrund dieser Eigenschaft findet Lehmputz in konventionell errichteten Massivbauten zunehmend Anwendung. Lehm gehört zu den nicht brennbaren Baustoffen (A1) und kann daher problemlos für Wandaufbauten mit erhöhten Ansprüchen an den Feuerwiderstand eingesetzt werden. So werden beispielsweise gemäß den Lehmbauregeln massive Wände aus Lehmbaustoffen einer Dicke von 24cm als F90 A eingeordnet (vgl. Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.) 2019: 98). Auch der Einsatz in Bauteilen mit erhöhten Schallschutzanforderungen ist aufgrund der hohen Dichte und Weichheit bei entsprechenden Wandaufbauten möglich.

#### 1.3.4 Aufbereitung von Rohlehm

Nach dem Abbau von Rohlehm muss dieser zu einer möglichst homogenen, gut zu verarbeitenden Masse aufbereitet werden. Dafür wird die gewachsene, heterogenen Struktur des Bodens aufgebrochen und unter Zugabe von Wasser neu vermischt. Die im Lehm enthaltenen Tonminerale nehmen das Wasser auf und lösen dadurch den Verbund zwischen den größeren Körnungen, was die weitere Bearbeitbarkeit ermöglicht (vgl. Schroeder 2019: 134).

Es kann zwischen einem natürlichen und einem mechanisierten Aufbereitungserfahren von Baulehm unterschieden werden. Die natürliche Aufbereitung basiert darauf, dass mit dem Einfluss des Faktors Zeit der Lehm durch chemische und physikalische Einflüsse der Witterung (z.B. Frost) sowie Fäulungs- und Gärungsprozesse der organischen Bestandteile, in seiner strukturellen Zusammensetzung verändert und homogenisiert wird. Die mechanisierte Aufbereitung von Baulehm wurde lange Zeit durch Treten und Stampfen von Menschen oder Tieren durchgeführt. Heutzutage wird diese Arbeit von unterschiedlichen, i.d.R. manuell geführten Maschinen verrichtet (vgl. Schroeder 2019: 134-141).

Durch verschiedene Nass- und Trockenaufbereitungsverfahren wird der abgebaute Baulehm mittels Maschinen durchmischt und zerkleinert. Im Anschluss kann der zerkleinerte Lehm gesiebt und in verschiedene Korn- und Agglomeratgrößen sortiert werden. In diesem Schritt werden organische Bestandteile wie Wurzeln und andere Störstoffe aussortiert. Zu großes und unbrauchbares Korn kann gezielt zerkleinert und im Anschluss erneut gesiebt und klassiert werden. Bei der feinsten Stufe der Zerkleinerung werden die kleinsten Bestandteile der Körnung gemahlen und zu Lehmehl verarbeitet. Durch die Klassierung der unterschiedlichen Korngrößen kann eine auf den Anwendungsfall angepasste Körnungslinie zusammengestellt werden. Schließlich wird durch die Zugabe von Wasser die gewünschte Plastizität hergestellt und gegebenenfalls Zusatzstoffe hinzugefügt, welche dem Baulehm bestimmte Eigenschaften verleihen können.

#### 1.3.5 Verarbeitung von Baulehm

Im plastischen Zustand kann der Baulehm durch verschiedene Methoden in die gewünschte Form gebracht und so zu einem einsatzbereiten Bauteil oder einen elementierten Baustoff verarbeitet werden. Zu den elementierten Lehm-Baustoffen zählen stein-, block-, oder plattenförmige Elemente. Lehmsteine und Blöcke können analog zum Mauerwerksbau zu einem Lehm-Bauteil, wie einer Wand, zusammengesetzt werden. Monolithische Bauteile können durch eine schichtweise Zugabe von feuchtem Lehm und unter einer lageweisen Verdichtung mit oder ohne Schalung hergestellt werden. Die Herstellungsverfahren der verschiedenen Formen im Lehm-Bau lassen sich in Pressformgebung, die freie manuelle Formgebung und Gießen unterteilen. Bei den verschiedenen Verfahren weist der Lehm durch die enthaltene Wassermenge die jeweils geeignete Konsistenz auf. Die Herstellungsmethode des „Pressens“ wird bei Stein- und Blockelementen aus Lehm in manueller oder maschineller Form mittels verschiedener Pressverfahren, Verdichtern und Stampfern angewandt. Bei der Herstellung von Stampflehm kommt eine Schalung zum Einsatz, die nach Erhärten des Lehms entfernt werden kann. Das formstabile Schalungssystem besteht aus seitlich angebrachten Schaltafeln, die von vertikalen Jochen gehalten werden. Die Joche der beiden Wandseiten werden durch orthogonal zur Wand laufende Steifen stabilisiert. Die Steifen definieren als Abstandhalter gleichzeitig die Wanddicke. Nachdem eine Lage der Stampflehm-Wand durch eine Druck-, Stampf- und Vibrationsverdichtung verdichtet wurde und ausgehärtet ist, wird die (Kletter-)Schalung entlang der Joche weiter nach oben versetzt. In Abhängigkeit der Belastung und Dimensionierung der Wand, kommen waagerechte Bewehrungseinlagen aus textilen Geweben oder Ringanker aus Stahlbeton zum Einsatz, die die Tragfähigkeit erhöhen (vgl. Schroeder 2019: 143-163).

Nach der Formgebung muss der Lehm fest werden. Die Verfestigung von Lehm basiert auf der Abgabe von Wassermolekülen durch Austrocknung an der Luft. Da die Abbindung rein physikalisch

stattfindet, bleiben plastischer und harter Lehm stofflich identisch. Dadurch kann er unter der Zugabe von Wasser in seiner reinen Form wieder recycelt werden. Wichtig zu beachten ist das Schwindverhalten durch den Wasserverlust, welches zu Rissbildung führen kann.

Die Austrocknungsgeschwindigkeit hängt vom Wassergehalt des Lehms, der Dicke des Bauteils und der Umgebungfeuchtigkeit ab. Im Idealfall nimmt die Feuchtigkeit im Lehmbauteil an der Oberfläche und im Inneren gleichmäßig ab. Durch ein gleichmäßig Schwindverhalten des Bauteils kann die Rissbildung minimiert werden kann (vgl. Schroeder 2019: 163).



Abbildung A1.27: Manuelle Herstellung Stampflehmwand.  
[Martin Rauch]

### 1.3.6 Zusatzstoffe und Zuschläge

Die Eigenschaften von Lehmbaustoffen können durch das Beimischen von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen an den jeweiligen Anwendungsbereich optimal angepasst werden.

Organische oder mineralische *Zusatzstoffe* verändern die physikalische Zusammensetzung des Lehms und setzen beispielsweise die Austrocknungsgeschwindigkeit herab. Diese Zusatzstoffe, welche die Rissbildung verringern, bewirken die Erhöhung der Druck- und Zugfestigkeit sowie die Verbesserung der Witterungsbeständigkeit. Leichte Zusatzstoffe haben zudem eine positive Auswirkung auf die Wärmedämmfähigkeit. Zu den organischen Zusatzstoffen zählen Stroh, Hanf, Holzhackschnitzel und Tierhaare. Die Fraktionen Sand, Kies, Blähton und Blähglas bilden die mineralischen Zusatzstoffe.

*Zusatzmittel* hingegen verändern die chemische Struktur des Lehms. Zu den organischen Zusatzmitteln zählen Pflanzensäfte und tierische Exkremente. Mineralische Zusatzmittel sorgen für eine Erhöhung der Stabilität des Baulehms. Häufig werden dazu hydraulische Bindemittel, wie Zement,

Baukalk und Gips dem Lehm beigefügt. Hydraulische haben den Nachteil, dass der so optimierte Lehm nicht mehr plastisch aufgearbeitet, wiederverwendet oder problemlos der Natur zurückgegeben werden kann. Zu den nicht hydraulischen Zusatzmitteln zählen Tonminerale, die in Form von Tonmehl einem mageren Baulehm beigemischt werden, um die Bindekraft zu erhöhen (vgl. Schroeder 2019: 170-172).

### 1.3.7 Lehmbauprodukte

Lehmbauprodukte sind in Form gebrachte oder ungeformte Baustoffe aus Lehm. Die Zusammensetzung aus Korn, Ton und eventuellen Zuschlägen ist speziell auf den Anwendungsbereich ausgelegt. Sie bestehen aus ungebranntem Lehm und zeichnen sich dadurch aus, dass sie ihre Festigkeit und Formstabilität lediglich durch Austrocknen an der Luft erhalten und durch die nachträgliche Aufnahme von Wasser wieder plastisch werden können. Für den Umgang mit Lehmbaustoffen, die keiner Norm unterliegen und auf der Baustelle hergestellt werden (siehe unten), gelten die seitens des Dachverbands Lehm aufgestellten Lehmbau Regeln (vgl. Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.) 2019).

Der moderne Lehmbau wird in die folgenden Lehmbaustoffe unterteilt (vgl. 1 Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.) o.J.):

#### Stampflehm

- Anwendung: tragende und nicht tragende Bauteile, in Form von vermauerten Lehmsteinen aus Stampflehm oder als monolithisches Bauteil mittels lagenweisen Einbaus in einer Schalung vor Ort oder im Werk. Stampflehm ist für statisch wirksame Wandkonstruktionen bis zu zwei Vollgeschossen im Wohnungsbau zugelassen, Konstruktionen darüber hinaus oder für andere Nutzungen, bedürfen der Zulassung im Einzelfall
- Mindestwanddicke Außenwand: 36,5cm (Geschosshöhe max.  $\leq 3,25\text{m}$ , bei einem Geschoss max.  $\leq 4\text{m}$  Wandhöhe)
- Mindestwanddicke Innenwände: 24cm (Geschosshöhe max.  $\leq 2,75\text{m}$ , Verkehrslast max.  $\leq 2,75\text{kN/m}^2$ , nur zulässig als Zwischenaufleger für durchlaufende Decken (Spannweite  $\leq 4,50\text{m}$ )
- Rohdichte: 1700 – 2200 kg/m<sup>3</sup>, schwerste Lehmbaustoff
- Wärmeleitfähigkeit: 1,40 W/mK (Rohdichte 2200 kg/m<sup>3</sup>)
- Verarbeitung: erdfeuchter Lehm mit grobem Sand, Kies und Split (evtl. Stroh und Pflanzenfasern)

#### Wellerlehm:

- Anwendung: tragende und nichttragende Wand, bis zu zwei Vollgeschossen in Wohnungsbau zugelassen, Konstruktionen darüber hinaus oder für andere Nutzungen, bedürfen der Zulassung im Einzelfall
- Mindestwanddicke Außenwand: 40cm (Geschosshöhe max.  $\leq 3,25\text{m}$ , bei einem Geschoss max.  $\leq 4\text{m}$  Wandhöhe)
- Mindestwanddicke Innenwände: 40cm (Geschosshöhe max.  $\leq 2,75\text{m}$ , Verkehrslast max.  $\leq 2,75\text{kN/m}^2$ , nur zulässig als Zwischenaufleger für durchlaufende Decken (Spannweite  $\leq 4,50\text{m}$ )
- Rohdichte: 1500 – 1800kg/m<sup>3</sup>
- Verarbeitung: Halbfeuchtes Gemisch aus Lehm und Stroh, Im Vergleich zu Stampflehm ohne Schalung hergestellt

#### Strohlehm:

- Anwendung: Findet heutzutage überwiegend bei der Sanierung von Fachwerkbauten und bei der Auskleidung von Gefachen Anwendung.
- Rohdichte: 1200 – 1700 kg/m<sup>3</sup>

- Verarbeitung: plastisches Gemisch aus Stroh und Pflanzenfasern, meistens Stroh

#### Leichtlehm:

- Anwendung: Druckfestigkeit ist durch die Zuschläge begrenzt. Leichtlehmsteine und Platten eignen sich daher nicht als tragende Bauteile. Sie können mit einer Tragstruktur, wie u.a. einer Holzständerwand als Tragskelett, kombiniert und als raumbildendes Bauteil ausgeführt werden
- Rohdichte: 400 - 1200 kg/m<sup>3</sup>
- Wärmeleitzahl: 0,12 W/mK (Rohdichte 400 kg/m<sup>3</sup>)
- Verarbeitung: Leichtlehme werden in breiig und flüssiger Konsistenz erarbeitet und mit mineralischen (Blähton u.a.) und organischen (Stroh, Holzhackschnitzel u.a.) Leichtzuschlägen versetzt, um unter anderem die Wärmedämmfähigkeit zu verbessern.

#### Lehmschüttung:

- Anwendung: Verfüllung von Geschossdecken und Hohlräumen
- Verfüllmaterial für Wand- und Deckenhohlräume
- Rohdichte: 400–2200 kg/m<sup>3</sup>
- Verarbeitung: in feuchter Konsistenz, mit organischen und mineralischen Leichtzuschlägen

#### Lehmmörtel:

- Anwendungen: Lehmmörtel bestehen aus magerem Baulehm mit Feinkörnigkeit und feinfaserigen Zuschlagstoffen. Lehmmörtel werden anhand ihrer Anwendungsbereiche unterschieden:
  - Lehmmauermörtel (DIN 18946): Vermauern von Lehmsteinen. Hoher Sandanteil
  - Lehmputzmörtel (DIN 18947): Putz im Innen und Außenbereich
  - Lehmspritzmörtel: Ausfachung von Fachwerkstrukturen, Erstellung von Vorsatzschalen und Innenwänden oder zur Deckenfüllung
- Rohdichte: Variiert je nach Anwendung

#### Lehmsteine:

- Anwendung: je nach Rohdichte (Leichtlehm oder Stampflehm) tragende oder nichttragende Bauteile (Deckenaufgabe, Ausfachungen, Vorsatzschale, Mauerwerkswand). Als tragende Wandkonstruktion sind Lehmsteine bis zu zwei Vollgeschossen im Wohnungsbau zugelassen, Konstruktionen darüber hinaus oder für andere Nutzungen, bedürfen der Zulassung im Einzelfall
- Mindestwanddicke Außenwand: 36,5cm (Geschosshöhe max. ≤3,25m, bei einem Geschoss max. ≤4m Wandhöhe)
- Mindestwanddicke Innenwände: 24cm (Geschosshöhe max. ≤2,75m, Verkehrslast max. ≤2,75kN/m<sup>2</sup>, nur zulässig als Zwischenaufleger für durchlaufende Decken (Spannweite ≤ 4,50m))
- Rohdichte: 600 –2200 kg/m<sup>3</sup>
- Verarbeitung: Konsistenz hängt von verschiedenen Herstellungsverfahren ab: Press- oder Strangpressverfahren
- Lehmsteine sind durch die Formgebung hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften und inneren Struktur homogene Lehmstoffe
- DIN 18945 Lehmsteine (Teilt Lehmsteine in Anwendungsklassen ein)

Lehmplatten:

- Anwendung: Als Platte im Trockenbaubereich: Bekleidung, Putzträgerplatte oder verlorene Schalung
- Rohdichte: 400 –1800 kg/m<sup>3</sup>
- Verarbeitung: Unter der Zugabe von Tonmehl können Lehmplatten durch verschiedene Verfahren hergestellt werden. Die Abmessungen von Lehmbauplatten sind in gängigen Plattenformaten aus dem Trockenbau erhältlich. Lehmbauplatten mit einer Stärke von weniger als 5cm sind nicht selbsttragend und benötigen eine Unterkonstruktion. 8 – 12,5cm starke Platten sind selbsttragend und kommen zunehmend im Bereich nichttragender Wände im Innenbereich zum Einsatz.
- DIN 18948 Lehmbauplatten

### 1.3.8 Vorfertigung von Stampflehmbauteilen

Trotz geringer Materialkosten, einer relativ einfachen Aufarbeitung des Rohmaterials und der technisch unkomplizierten Herstellung von Stampflehmbauteilen ist die konventionelle Arbeit auf der Baustelle mit viel Aufwand verbunden. Durch die Substitution des händisch geführten Stampfers mit automatisierten und maschinellen Stampfern, kann zwar Kraft eingespart werden, jedoch bleibt der Zeitaufwand weiterhin hoch. Das macht den Stampflehmbau in einer Vor-Ort-Bauweise im Vergleich zu einer gängigen Massivbauweise deutlich kostenintensiver. Da ökonomische Aspekte den Wettbewerb dominieren, sind Lehmbauten trotz ihrer vielen Vorteile nicht so häufig vertreten und stellen besonders im Bereich der Großbauten eine Ausnahme da. Die maschinelle Vorfertigung im Werk ist daher für den bis dahin von traditionellen und handwerklichen Fertigungsmethoden geprägten Stampflehmbau eine Revolution, die viele Verbesserungen hinsichtlich der Qualität und Wirtschaftlichkeit mit sich führt. Aktuelle Beispiele wie das Ricola-Fertigungsgebäude (Schweiz, 2014), welches von dem Architekturbüro Herzog & de Meuron in Zusammenarbeit mit Martin Rauch entwickelt wurde, zeigen, dass durch Vorfertigung von großformatigen (Stampf-)Lehmbauteilen, der Lehm auch in großmaßstäblichen Bauaufgaben Anwendung finden kann.

Bei der automatisierten Vorfertigung kommen Maschinen zum Einsatz, die die Schalung einer Stampflehmwand mit Lehm befüllt und gleichzeitig verdichtet. Das spart Zeit und Personal und es können außerdem sehr schlanke Wände von nur 20cm Dicke hergestellt werden, während bei einer manuellen Produktion aufgrund vom Bewegungsraum und den Abmessungen von Walze und Rüttelplatte meist nur eine minimale Dicke von ca. 60cm möglich ist. Die Montage der vorgefertigten Stampflehmelemente durch Kräne sorgt für eine deutliche Verringerung der Bauzeit vor Ort im Vergleich zum traditionellen Bauprozess, bei dem Lehm auf der Baustelle angemischt und die Wand Schicht für Schicht errichtet wird. Die schnelle Montage der Fertigteile macht den gesamten Bauprozess besser koordinier- und planbar, sodass die verschiedenen Gewerke effizient zusammenarbeiten können. Ein großer Vorteil der Vorfertigung im Werk ist außerdem die Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen, die bei der Aushärtung von Lehmbauteilen von großer Bedeutung ist. Bei großen Projekten kann es sinnvoll sein, die Fertigungsanlagen nahe der Baustelle zu errichten, um Transportwege zu sparen und gleichzeitig lokale Baustoffe zu nutzen (vgl. Rauch 2015: 118).

Die Universität Braunschweig beschäftigt sich seit 2016 mit digitalen und robotischen Fertigungstechniken von Stampflehmbauteilen. Das Forschungsprojekt zeigt, dass die Produktion von großformatigen Bauteilen aus Stampflehm hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, Qualität und Produktionstechnik optimierbar ist. Eine neue, robotergestützte Fertigungstechnik basiert auf der Idee, die Arbeitsschritte des lageweisen Verdichtens und der Schalungsmontage (Gleitschalung) zusammenzufassen und zu automatisieren. Dabei bewegt der Roboterarm das Schalungssystem gemeinsam mit der Materialzufuhr und dem Verdichtungswerkzeug (digital gesteuerte Rüttelplatte).



Dadurch entfällt der aufwändige Prozess des Versetzens der Kletterschalung sowie die Materialkosten des Schalungssystems. Das Problem der höheren Kosten von Stampflehmbauweise im Vergleich zu anderen Massivbauweisen kann also durch die Optimierung von Fertigungsverfahren verringert, oder sogar behoben werden (vgl. Reese und Woehrlin 2019).



Abbildung A1.28: Vorgefertigte Stampflehmblöcke  
[Herzog de Meuron/Martin Rauch]

### 1.3.9 Recycling

Der mineralische Rohstoff Lehm ist, wie Sand und Kies, nicht nachwachsend und somit im natürlichen Vorkommen begrenzt. Mit Blick auf die stetig steigende Nachfrage von konventionellen mineralischen Baustoffen, die im Herstellungsprozess sehr energieaufwendig sind und sich negativ auf die Umwelt und das Klima auswirken, ist ein schonender und nachhaltiger Umgang mit endlichen Rohstoffen dringend notwendig. Um die primären Rohstoffquellen zu schonen, können Sekundärrohstoffe, welche bei Erdarbeiten im Hoch- und Tiefbau als Bodenaushub anfallen, genutzt werden. Dieser Bodenaushub stellt mit 125,2 Mio. Tonnen den mit Abstand (58,3%) größten Anteil der Bauabfälle in Deutschland dar (vgl. 1 Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.) o.J.). Wenn der Lehmanteil des Bodenaushubs in ausreichender Menge und Qualität vorkommt und der Transportweg zum Ort der Aufbereitung und Weiterverwendung ökologisch und ökonomisch vertretbar ist, ist die Nutzung der sekundären Rohstoffquelle besonders zu bevorzugen.

Am Ende der Lebenszeit eines Lehmgebäudes kann erhärteter Lehm dank der Wasserlöslichkeit unter der Zugabe von Wasser replastifiziert und in Abhängigkeit der Zusatzmittel unendlich oft und ohne Qualitätsverlust wiederverwendet werden. Durch ein Aufschwämmen werden die Kapillarkraftbindungen zwischen den verschiedengroßen Korngrößen aufgelöst und das Grobkorn von den tonhaltigen Agglomeraten, dem Bindemittel, getrennt. Dadurch wird zudem ermöglicht, dass sich der Lehm rückstandslos von anderen Bau- und Störstoffen, wie Beton und Stahlbewehrung lösen lässt. Dadurch kann das Material ohne großen Energieaufwand wiederverwendet oder wieder Teil des Bodens werden, aus dem der Lehm entnommen wurde. Aus diesen Gründen sollte Lehm möglichst nicht mit Zement oder anderen chemischen Zusatzstoffen angemischt werden.

Werden diese wesentlichen Voraussetzungen für einen nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen beachtet, stellt sich Lehm als besonders umweltfreundliches Material heraus.

### 1.3.10 Gebaute Beispiele

Im Folgenden werden zwei Beispiele von öffentlichen Gebäuden vorgestellt, in denen tragende Stampflehmwände Anwendung finden. Im Anschluss wird ein Museumsbau beschrieben, in dem Lehmputz gezielt eine Raumklima regulierende Funktion übernimmt.



Abbildung A1.29: Baustelle Kapelle der Versöhnung  
[Martin Rauch]



Abbildung A1.30: Innenraum der Kapelle der Versöhnung  
[Bruno Klomfar]

#### 1.3.10.1 Kapelle der Versöhnung (1999/2000), Peter Sassenroth und Rudolf Reitermann

Mit der Errichtung der Kapelle der Versöhnung in Berlin, nach den Plänen von Peter Sassenroth und Rudolf Reitermann, entstand 1999/ 2000, nach über hundert Jahren, das erste öffentliche Gebäude

in einer Stampflehm Bauweise in Deutschland. Der ovalförmige Gebetsraum besteht aus sieben Meter hohen und 60cm dicken Wänden, die eine hölzerne Dachkonstruktion tragen. Diese Bauaufgabe war Neuland für die Behörden und Statiker und erforderte ein eigenes Genehmigungsverfahren, die Zulassung im Einzelfall, sowie das Bereitstellen von umfangreichen Materialanalysen zur Tragfähigkeit und eine baubegleitende Überwachung durch Gutachter (vgl. 1 Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.) o.J.).



Abbildung A1.31: Ansicht Gemeindezentrum Karlsruhe  
[Oliver Rieger, für PIA-Architekten]

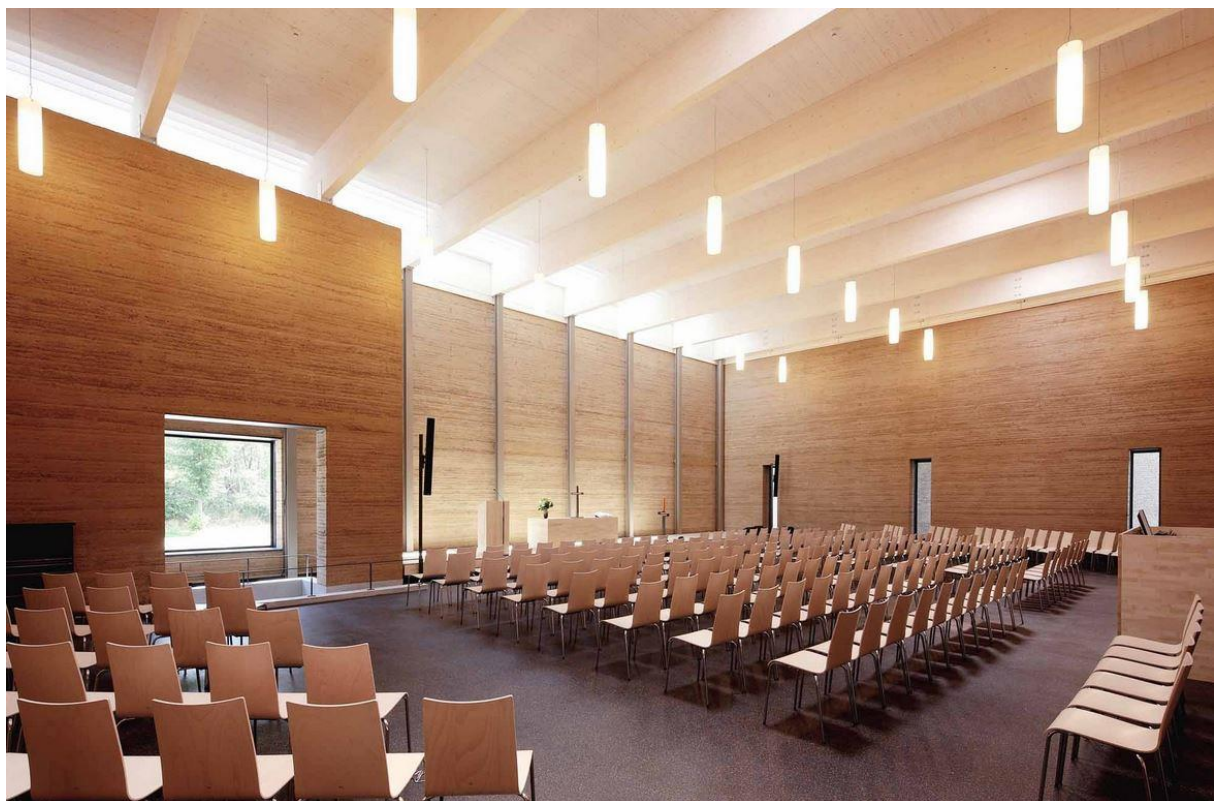


Abbildung A1.32: Tragende Stampflehmwand im Gemeindezentrum Karlsruhe  
[Oliver Rieger, für PIA-Architekten.]

### 1.3.10.2 Gemeindezentrum Karlsruhe (2011), PIA Architekten

Ein jüngeres Beispiel für eine (teilweise) tragende Stampflehmwand in einem öffentlich genutzten Gebäude ist das 2011 errichtete evangelische Gemeindezentrum in Karlsruhe. Die 8 Meter hohen und bis zu 60cm dicken massiven Stampflehmwände rahmen den Gottesdienstraum und tragen partiell die Lasten der Dachkonstruktion.



Abbildung A1.33: Ansicht Vorarlberg Museum in Bregenz  
[Adolf Bereuter für cukrowicz nachbaur architekten]



Abbildung A1.34: Ausstellungsraum mit Lehmputz  
[Hanspeter Schiess für cukrowicz nachbaur architekten.]

### 1.3.10.3 Vorarlberg Museum (2013), Cukrowicz Nachbaur Architekten

Die hygrischen Eigenschaften für eine passive Stabilisierung von Räumen mit hohen Anforderungen an ein konstantes Raumklima werden gezielt für Bauaufgaben im Bereich der Denkmalpflege, der Restauration von historischen Gebäuden, aber auch Neubauten, wie beispielsweise Museen eingesetzt. Ein prominentes Beispiel für diese Anwendung ist das Vorarlberg Museum in Bregenz (2013). Aus konservatorischen Anforderungen an das Raumklima, haben die Planer des Baus die Vorgabe erhalten, dass die relative Luftfeuchte um maximal +/- 3% schwanken darf. Als passive Unterstützung der Raumlufttechnik wurden die Betonwände mit einer 3cm dicken Lehmschicht verputzt. Durch den

Lehmputz konnte die Lüftungstechnik deutlich reduziert werden. Darüber hinaus zeigen die Messergebnisse nach mehrjähriger Betriebszeit, dass der berechnete Energiebedarf der Lüftungsanlage dauerhaft um 40% reduziert werden konnte (vgl. 2 Dachverband Lehm e.V. (Hrsg.) o.J.).

### **1.3.11 Fazit: Anwendung im Museumsbau**

Mit Blick auf die ökologischen Vorteile des Materials, sowie das weite Anwendungsfeld von Lehmprodukten ist Lehm zweifelsfrei für den Museumsbau geeignet. Lehmplatten und Lehmputz findet bereits vereinzelt in Gebäuden mit klimatisch-konservatorischen Ansprüchen Anwendung, wie im Vorarlberg Museum in Bregenz. Für nicht tragende Bauteile im Innenraum erfüllt Lehm mit Leichtigkeit die nötigen Anforderungen. Im Außenbereich, sowie im Bereich der tragenden Bauteile ist eine genauere Betrachtung notwendig. Tragender Stampflehm stellt jedoch für diese Bauaufgabe (noch) eine Ausnahme dar. Zwar wurden Planungs- und Fertigungstechniken besonders im Bereich Stampflehmtechnik in den letzten Jahren so weiterentwickelt, dass die Anwendungsbereiche enorm erweitert wurden, jedoch mangelt es noch an einer größeren Zahl von Referenzobjekten und somit an praktischer Erfahrung, sowohl seitens der planenden, als auch der ausführenden Gewerke. Neben deutlich höheren Herstellungskosten im Vergleich zu einer konventionellen Massivbauweise, kommt ein noch weit verbreitetes Imageproblem von Lehm hinsichtlich der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit hinzu, sodass eine konkrete Planung und Umsetzbarkeit häufig an Vorbehalten und wirtschaftlichen Gründen scheitert. Auch die Voraussetzung der Zustimmung im Einzelfall für die Errichtung einer Stampflehmwand in öffentlichen Gebäuden, stellt ein potenzielles Hindernis für einige Planer und Bauherren dar. Dabei ist die Voraussetzung der statischen Berechnung sowie die technische Umsetzbarkeit für anspruchsvolle Anwendungsbereiche gegeben.

## 2 Ausbaustoffe

### 2.1 Dämmstoffe

#### 2.1.1 Einleitung

Der Gebäudesektor ist für 14% des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland verantwortlich. Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung verfolgt das Ziel, den Gebäudebestand bis 2050 „nahezu“ klimaneutral zu gestalten. Dazu sollen zunächst die Emissionen bis 2030 (72 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent) um ca. 66-67% im Vergleich zu 1990 (209 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent) reduziert werden. Im Rahmen der geplanten und geförderten Sanierungsmaßnahmen sowie der wachsenden Ansprüche an den Neubaustandard, kommt der Rolle von Dämmstoffen eine besondere Bedeutung zu. Daher ist der Einsatz großer Mengen von Dämmstoffen zukünftig absehbar (vgl. BMU 2019). Neben der grundsätzlichen technischen und bauphysikalischen Eignung der Dämmung für den jeweiligen Anwendungsbereich (Fundament, Fassade, Decke, Dach) kommen heute Aspekte der Entsorgung und des Recyclings, Ressourcenverbrauchs sowie der Ökobilanz von Dämmstoffen hinzu. Im Sinne des ökologischen Bauens bieten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffquellen in vieler Hinsicht Vorteile gegenüber konventionellen Dämmstoffen, die im folgenden Text erläutert werden.

#### 2.1.2 Historischer Überblick

Seit den Anfängen des Bauens beschäftigen sich Menschen mit dem Thema Wärmedämmung. Dazu wurden stets die wärmedämmenden Eigenschaften von ruhenden und isolierten Luftschichten genutzt. Die historische Entwicklung der Dämmstoffe ist jedoch keine geradlinige. Bereits in der Bronzezeit hatte der Wärmeschutz einen hohen Stellenwert. Ein zweischaliges mit Lehm beworfenes Flechtwerk aus Zweigen und Ästen wurde mit getrocknetem Gras ausgefüllt. Bei einer Stärke von 10cm und einer dichten Ausstopfung, konnte ein U-Wert von bis zu 0,5 bis 1,0 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht werden. Die bronzezeitliche Wand wurde von einer Holzblockwand aus geschichteten Rundstämmen abgelöst. Diese Wand wies eine höhere Beständigkeit und Tragfähigkeit auf. Je nach Wanddicke und Fugenanteil konnte ein U-Wert von 0,5 bis 0,8 W/(m<sup>2</sup>K) erreicht werden. Im Mittelalter kam es aufgrund der Verknappung von Holz zur Entwicklung der Fachwerkwand, welche einen deutlich schlechteren Wärmeschutz aufwies. Eine 16cm dicke Fachwerkwand besaß einen U-Wert von etwa 1,6 W/(m<sup>2</sup>K). Wer konnte, verkleidete den Innenraum mit Holzplatten. Pflanzenfasern wie Stroh und Schilfrohr als Dachbedeckung boten einen guten Wärmeschutz und stellten vielerorts bis zur Industrialisierung den Standard dar. Aus Gründen des Brandschutzes wurde die weiche Dacheindeckung im 19. Jahrhundert durch Ziegel abgelöst. Diese wiesen jedoch in der Regel einen schlechteren Wärmeschutz auf. Holzbalkendecken bestanden aus beplankten Holzbalken, deren Zwischenräume mit Strohhelmwickel und Sand gefüllt wurden und einen U-Wert von 1,0 W/(m<sup>2</sup>K) erreichten. Öffnungen in der Wand und im Dach stellten in Mittel- und Nordeuropa *Wärmebrücken* dar und wurden lange Zeit auf das Nötigste reduziert. Die ersten Einscheiben-Verglasungen kamen im 14./15. Jahrhundert auf und boten einen Dämmwert von 4,8 W/(m<sup>2</sup>K). Die Wärmequelle für den Innenraum blieb lange Zeit die Feuerstelle. Ein Bewusstsein für Wärmedämmung im heutigen Sinne gab es noch nicht. Mit der industriellen Fertigung von Backsteinen wird die Fachwerkwand im Verlauf des 19. Jahrhunderts durch eine massive Ziegelwand ersetzt. Die Gründe dafür waren eine höhere Beständigkeit, Belastbarkeit und die hohe Verfügbarkeit von Backstein. Der U-Wert der typischerweise 38 cm dicken Wand betrug 1,56 W/(m<sup>2</sup>K) und war in der Regel etwas höher als der einer Fachwerkwand.

Im Zuge der industriellen Revolution entstand eine Dämmstoffindustrie, die durch neue technische Möglichkeiten die Entwicklung der Dämmstoffe vorantreibt und schnell eine große Produktvielfalt anbieten konnte. Die ersten Dämmstoffe waren Kork und Kieselgut, welche überwiegend in den

damals neu erfunden Kühlhäusern eingesetzt wurden. Die Anwendung im Hochbau stellte eine Ausnahme dar. Erst mit der Kohleknappheit in den 1920er Jahren änderte sich der Blick auf die Anwendung von Dämmstoffen im Hochbau. Um die steigenden Heizkosten zu minimieren, kamen Holzwolle, Flachs, Kork, Torf und Wolle sowie industrielle (Neben-)Erzeugnisse wie Leichtbaustoffe aus Bims oder Schlacke und Mineralfasern, wie Glas- und Steinwolle, zum Einsatz. 1924 wird der Hersteller Heraklit gegründet, der sich für ca. 50 Jahre als Marktführer etablieren konnte. Die Holzwollplatten stellen zu dieser Zeit den meistverbauten Dämmstoff dar. Mit Beginn der Chemieindustrie entstanden in den 1940er-Jahren erste Kunstharzschäume. Der Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg geschah überwiegend nach bekannter und bewährter Manier: die 38cm-Vollziegelwand stellte den Maßstab des Wärmeschutzes dar. Auch die Einführung der DIN 4108 „Wärmeschutz im Hochbau“ im Jahr 1952 konnte den allgemeinen Standard nicht ändern, da die Zusammenhänge von Wärmedämmfähigkeit der Wand und den Einsatz von Heizenergie noch nicht erkannt wurden. Der in diesem Rahmen eingeführte Mindestwärmeschutz hatte lediglich das Ziel des Tauwasserschutzes und den Hygienestandard zu erhöhen. Mit wenigen Zentimetern wurden nun Dächer und Fußböden, die an die Außenluft oder an das Erdreich grenzen, gedämmt. In 1960er Jahren lösten Stein- und Glaswollprodukte die Holzfaserplatten als den dominierenden Dämmstoff ab. Auch Kork- und Torfdämmungen verloren an Bedeutung. Gleichzeitig kamen Dämmstoffe aus Polystyrol, Polyurethan, XPS und Schaumglas auf den Markt. Mit der Energiekrise 1973 wurde die Diskussion über Energie, Klima und die Auswirkungen auf die Umwelt angestoßen. In diesem Rahmen wurde mit dem Ziel, Heizkosten zu sparen, die Wärmeschutzverordnung 1977 und 1984 eingeführt (Energieeinsparverordnung - EnEV). Daraufhin verdreifachte sich der Einsatz von Dämmstoffen im Neubau und Bestand. Das Wärmedämmverbundsystem konnte sich ab den 1980er Jahren durchsetzen. Mit der Entwicklung von Berechnungsregeln wurden zukunftsweisende Energiestandards, wie das Passiv- und das Niedrigenergiehaus definiert. Diese neuen Standards sowie das wachsende Bewusstsein in der Gesellschaft für Umwelt- und Klimafragen förderten den Einsatz von Dämmstoffen. Heute dominieren die Dämmstoffe aus Mineralwolle und Hartschaumplatten den Markt. Dämmsysteme sind inzwischen so weit entwickelt, dass sie ohne eine aktive Beheizung auskommen. Im Rahmen der aktuellen Umweltdiskussion ist eine Rückkehr zu ökologischen Naturfaserdämmstoffen zu erkennen. Ihr Marktanteil ist jedoch aus ökonomischen Gründen, begrenzten Einsatzmöglichkeiten, geringfügig schlechteren Dämmwerten sowie in Teilen einem schlechten Image begrenzt (vgl. Eicke-Henning 2017).



Abbildung A1.35: Nachbau einer gedämmten Wand aus der Bronzezeit

[[https://llh.hessen.de/umwelt/biorohstoffnutzung/stoffliche-nutzung/lehm-ein-nachhaltiger-baustoff/.](https://llh.hessen.de/umwelt/biorohstoffnutzung/stoffliche-nutzung/lehm-ein-nachhaltiger-baustoff/)]

### 2.1.3 Funktionalität

Wärmedämmung funktioniert nach dem Prinzip des Einschlusses von Luft, Gasen oder einem Vakuum in Hohlräumen eines Materials. Da Luft Wärme nur schlecht leitet, wird die Wärmeleitfähigkeit (k-Wert) eines Materials mit steigender Porosität verringert. Materialien mit einem hohen Porenanteil und einer geringen Dichte eignen sich daher gut als Dämmstoffe. Sie spielen für energiesparendes Bauen eine wesentliche Rolle bei der Dämmung der Außenhülle um Wärmeverluste zu minimieren und energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Das spart nicht nur Kosten, sondern kommt durch reduzierte energiebedingte Emissionen dem Klima zugute. Der Markt stellt eine große Auswahl an Dämmstoffen für alle Anwendungsbereiche zur Verfügung. Je nach Verarbeitungsform haben sie unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich der Schalldämmung, Wärmespeicher- und Leitfähigkeit, Feuchtigkeitsverhalten, Brandverhalten und Druckfestigkeit. Da die Dämmschicht in der Regel nach ihrem Einbau nur schwer zugänglich ist, ist die Qualität und die Dauerhaftigkeit bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit besonders zu berücksichtigen. Neben Aspekten der Wirtschaftlichkeit und der oben genannten technischen und bauphysikalischen Anforderungen, spielen ökologische Parameter wie Verbraucher-, Umwelt- und Ressourcenschutz eine wichtige Rolle.

### 2.1.4 Konventionelle Dämmstoffe

Konventionelle Dämmstoffe bestehen aus mineralischer Glas- und Steinwolle oder erdölbasierter Hartschaumdämmstoffe, wie XPS, EPS und PUR. Die Produktion dieser Dämmstoffe ist mit einem relativ aufwendigen Herstellungsprozess und im Vergleich zu biotischen Dämmstoffen, hohem Einsatz von nicht erneuerbarer Primärenergie verbunden. Für die Produktion von Glas- und Steinwolle kommen anteilig Sekundärrohstoffe, wie Altglas (Glaswolle) und industrielle Nebenerzeugnisse der Zementindustrie (Steinwolle) zum Einsatz, jedoch bleibt der Anteil der Primärrohstoffe aus nicht erneuerbaren Rohstoffquellen relativ hoch. Erdöl ist als fossiler Rohstoff in seinem Vorkommen endlich und geht aus ökonomischer Sicht mit einer Abhängigkeit von internationalen Rohölpreisen einher. Weitere Nachteile weisen erdölbasierte Dämmstoffe hinsichtlich des Brandverhaltens und der Entwicklung von human toxischen Gasen auf, welches ein erhöhtes Risiko im Brandfall darstellt. Darüber hinaus ist die Entsorgung und der Rückbau von konventionellen und in der Vergangenheit eingebauten Dämmstoffen aufgrund eines potenziellen Schadstoffgehalts aufwendig und mit erhöhten Kosten verbunden. Schadstoffe, wie Asbest, Formaldehyd oder Polystyrol zugesetzten Flammenschutzmittel (z.B. HBCD), können zu Gesundheitsschäden durch das Ausdünsten in die Raumluft führen. Erdöl- und mineralfaserbasierte Dämmstoffe weisen, beim aktuellen Stand der Technik, ein geringes Recyclingpotential auf. In der Regel kommt es zu einer thermischen Verwertung oder Entsorgung auf einer Deponie. Konventionelle Massendämmstoffe dominieren jedoch nicht zuletzt aufgrund von günstigeren Materialpreisen den Markt. Weitere Vorteile gegenüber biotischen Dämmstoffen liegen neben tendenziell besseren Dämmwerten, unter anderem im Bereich der Feuchteresistenz und Belastbarkeit (XPS, EPS) sowie einer fehlenden Brennbarkeit (Mineralfaserprodukte).

### 2.1.5 Biotische Dämmstoffe

Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen bieten ökologische und baubiologische Vorteile und können konventionelle Dämmstoffe in vielen Anwendungen ersetzen. Aufgrund einer hohen Produktvielfalt biotischer Dämmstoffe, bezieht sich der folgende Text auf die überwiegend gemeinsamen Eigenschaften der Dämmstoffe. Diese können jedoch je nach Material (u.a. Stroh, Seegras, Schafsschurwolle) variieren und sollten daher produktspezifisch betrachtet werden.



### 2.1.6 Herstellung und Rohstoffe

Naturdämmstoffe bestehen aus nachwachsenden Rohstoffen, Pflanzenfasern wie Holz, Gräsern oder auch tierischer Wolle. Neben primären Rohstoffquellen werden häufig Sekundärrohstoffe, industrielle und landwirtschaftliche Nebenerzeugnisse und Abfallprodukte verwendet. So beziehen beispielsweise Hersteller von Holzfaser- oder Holzspanbasierter Dämmung das Ausgangsmaterial im besten Fall aus Nebenerzeugnissen der Sägeindustrie, wie Holzspäne. Zelluloseflocken bestehen aus mindestens 80% Altpapier, Jutedämmmatten aus alten Jutesäcken und Flachs aus Kurzfasern, die als Nebenprodukt in der Textilindustrie anfallen. Baustroh als ein Nebenerzeugnis aus der Landwirtschaft ist als Rohstoff günstig und weist einen besonders kleinen ökologischen Fußabdruck auf. Der Einsatz ist daher besonders ressourcenschonend und nachhaltig. Zudem binden pflanzliche Rohstoffe während ihrer Wachstumsphase  $\text{CO}_2$ , was sich positiv auf die gesamtheitliche Ökobilanz der Materialien auswirkt.

Holzfaserdämmungen bedürfen jedoch einem ähnlich hohen Primärenergieeinsatz wie konventionelle Dämmstoffe. Wiederum weisen Sie im Gegensatz zu fossilen und mineralischen Vertretern, ein negatives Treibhausgaspotential auf und sind daher als klimafreundlich einzustufen.

Die Produktvielfalt und Formgebung von biotischen Dämmungen variieren von harten Platten, über weiche Matten und Filze bis zur ungebundenen Schütt- und Einblasdämmung. Die Formgebung und Verarbeitungsmöglichkeiten hängen von den Eigenschaften des Ausgangsmaterials ab. Für die ungebundene Anwendung als Einblas- oder Schüttdämmung wird das Ausgangsmaterial, falls die gebrauchstaugliche Größe nicht bereits vorhanden ist, zerkleinert und zu Flocken, Fasern und Spänen verarbeitet. Je nach Beschaffenheit der Rohstoffe und der gewünschten Formgebung, ist der Einsatz von zusätzlichen Bindemitteln, auf natürlicher (u.a. Lignin), chemischer (u.a. PUR-Harz) Basis oder durch synthetische Stützfasern notwendig. Beispielsweise wird bei dem Herstellungsverfahren von Holzfaserdämmplatten zwischen einem Nass- und einem Trockenverfahren unterschieden. Ersteres basiert auf dem Einfluss von Wasser und Hitze. Das Ergebnis ist ein sortenreines und formstabiles Produkt, das durch das holzeigene Bindemittel Lignin seine Form beibehält. Das Trockenverfahren ist weniger energieintensiv, verbraucht kein Wasser, basiert jedoch auf dem Einsatz zusätzlicher Bindemittel. Dadurch verliert das Produkt seine Monomaterialität, wodurch ein Recycling und eine Kompostierung eingeschränkt werden. Darüber hinaus können mechanische Fügeverfahren, wie eine Bindung mittels eines Drahts, wie bei der Herstellung von Schilfrohrplatten, die Formstabilität gewährleisten. Darüber hinaus können biotische Dämmstoffe mit verschiedenen Zusätzen wie Borsalzen und Bioziden behandelt werden, um die Widerstandsfähigkeit und den Schutz vor Feuer, Feuchte, Verrottung und Schädlingen zu erhöhen. Die Verwendung von chemischen Zusätzen kann zu einer Verschlechterung der Umweltverträglichkeit und Ökobilanz führen und eine natürliche Kompostierung einschränken. Um diese Nachteile und gesundheitliche Risiken auszuschließen, sollten, wenn möglich, einstoffliche Dämmstoffe bevorzugt werden.



Abbildung A1.36: Zelluloseflocken aus Altpapier [minicel73 / Adobe Stock.]



Abbildung A1.37: Getreidefeld

[<https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/stroh-782356/gallery-1/1.>]



Abbildung A1.38: Jutesäcke  
[Thermo Natur]



Abbildung A1.39: Flachsfasern  
[Wikimedia Commons.]

## **2.1.7 Eigenschaften**

### **2.1.7.1 Wärme**

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffquellen entsprechen den heutigen Anforderungen an die Wärmedämmfähigkeit und können unter diesem Aspekt nahezu gleichwertig zu konventionellen Dämmstoffen eingesetzt werden. Die Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen Naturmaterialien variiert zwischen 0,036 und 0,05W/mK. Damit sind sie keine Hochleistungsdämmstoffe und benötigen je nach Dämmstofftyp einen höheren Materialaufwand, um gleiche Dämmwerte wie konventionelle Dämmstoffe zu erreichen.

### **2.1.7.2 Behaglichkeit**

Viele biotische Dämmstoffe erfüllen hohe Ansprüche an Gesundheit und Behaglichkeit und finden daher unter Aspekten des biologischen und gesunden Bauens Anwendung. Dank der Fähigkeit bis zu 30% des Eigengewichts an Raumlufffeuchte aufzunehmen und problemlos ohne Einbuße in der Dämmleistung, zeitversetzt abzugeben, tragen Naturdämmstoffe maßgeblich zu einem ausgeglichen und angenehmen Raumklima bei. Zudem sind sie diffusionsfähig und ermöglichen, Wasserdampf aus dem Innenraum zu verdunsten. Die Fähigkeit der Feuchteaufnahme ist jedoch begrenzt. Wenn die Dämmung nass wird und nicht abtrocknen kann, besteht die Gefahr der Schimmelpilzbildung.

Aufgrund ihrer Dichte besitzen Dämmstoffe aus Holzfaserplatten und Zellulose eine hohe Wärmespeicherfähigkeit und können einen hohen sommerlichen Wärmeschutz gewährleisten. Ein weiterer Vorteil für das Raumklima ist, dass Naturdämmstoffe nur geringen bis keinen Anteil chemischer Zusatzstoffe enthalten und daher keine Schadstoffe in die Raumluft abgeben.

### **2.1.7.3 Schalldämmung**

Viele Naturdämmstoffe können außerdem raumakustische Aufgaben übernehmen. Dazu können Sie in Form einer Trittschalldämmung, als Füllmaterial im Wandzwischenraum oder als sichtbares Bekleidungsmaterial Anwendung finden.

### **2.1.7.4 Brennbarkeit**

Dämmstoffe aus natürlichen Rohstoffen haben den Ruf, ein erhöhtes Risiko im Brandfall darzustellen. Grundsätzlich sind sie brennbar, stellen bei fachmännischem Einbau jedoch kein erhöhtes Risiko im Brandfall dar. Die meisten biotischen Dämmmaterialien sind der Baustoffklasse B2, normal entflammbar oder B1, schwer entflammbar zugeordnet. Darüber hinaus haben biotische Dämmstoffe im Vergleich zu erdölbasierten Dämmstoffen den Vorteil, dass sie im Brandfall nicht brennend tropfen und die entstehenden Rauchgase deutlich weniger toxisch sind. Rauchgase stellen im Brandfall eine deutlich höhere Gefahrenpotential dar als das Feuer selbst.

Holzbasierte Dämmstoffe bilden im Brandfall eine Kohleschicht, die die darunterliegenden Bauteilschichten schützt. Die hohe Wärmespeicherfähigkeit von Holzfaserdämmplatten verzögert zudem die Temperaturentwicklung von unter der Dämmung liegenden Schichten. Um die Brandeigenschaften von biotischen Dämmstoffen zu verbessern, können sie mit Zusätzen, wie Flammschutzmitteln, behandelt werden.

Der Massendämmstoff EPS (Polysterol Hartschaum) wird ebenfalls, in Abhängigkeit von der Zugabe von Flammschutzmittel, in die Baustoffklasse B2 oder B1 eingestuft. Somit könnten Naturdämmstoffe unter brandschutztechnischen Aspekten Dämmstoffe aus Polysterol Hartschaum problemlos ersetzen. Sie sind jedoch für Anwendungsbereiche mit erhöhten Brandschutzanforderungen nicht geeignet. Für Anforderungen, die nicht brennbare Dämmstoffe (Baustoffklasse A1) voraussetzen, kommen in der Regel Mineralwolle oder alternativ Dämmstoffe aus Schaumglas zum Einsatz.

### 2.1.8 Grenzen

Der Einsatz von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen ist aufgrund ihrer biophysikalischen Eigenschaften für Anwendungen in dauerhaft feuchten oder nassen Bereichen, wie erdberührten Bauteilen (Perimeterdämmung), oberhalb der Abdichtungsebene eines Flachdachs und zur Kerndämmung von Außenwänden aus Mauerwerk nicht möglich. Als rohstoffschonende Alternative zu erdölbasierenden Dämmstoffen eignen sich für diesen Anwendungsbereich beispielsweise Dämmstoffe aus Schaumglas, in Form von Platten oder Schotter, die einen hohen Recyclinganteil aus Altglas aufweisen und in reiner Form kreislauffähig sind. Schaumglasprodukte weisen jedoch aufgrund eines energieintensiven Herstellungsprozesses ein deutlich höheres Treibhausgaspotential (CO<sub>2</sub>-Äquivalent) als erdölbasierte Dämmstoffe auf. Vorteile der Kreislauffähigkeit und Schonung primärer Rohstoffquellen müssen an dieser Stelle mit klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen abgewogen werden. Darüber hinaus eignen sich Naturdämmstoffe nicht für Anwendungen mit Anforderungen an nicht brennbare Bauteileigenschaften (Baustoffklasse A).

### 2.1.9 Anwendungsbereiche

Die Entwicklung der thermischen Gebäudeisolierung hat gezeigt, dass vorindustrielle Dämmstoffe aus nachwachsenden und lokal verfügbaren Rohstoffen, sich überwiegend aus Pflanzenfasern wie Holz, getrocknetem Gras, Stroh und Schilf zusammensetzen. Auch Schafsschurwolle kann als ein nachwachsender und historischer Dämmstoff, in diesem Fall in Form von Kleidung, eingeordnet werden. Darüber hinaus wurden Sand und Lehm, in Kombination mit Stroh, aus Wärme- und Schallschutzgründen in Deckenaufbauten verwendet. Unter den ersten Dämmstoffen der Industrialisierung fanden sich ebenfalls Materialien aus nachwachsenden Rohstoffquellen wie Kork und insbesondere Holzleichtbauplatten, welche den Markt bis in die 60er Jahre dominierten.

In den letzten Jahrzehnten wurden die „historischen“ Naturdämmstoffe aus unter anderem Holz, Stroh und Leichtlehm weiterentwickelt und die Rohstoffbreite aus nachwachsenden Quellen um viele weitere Materialien wie Hanf, Zellulose und Kokos erweitert. Die Naturdämmstoffe finden im Bereich Dach, Wand, Decke in Neubauten sowie bei der Bestandssanierung Anwendung. Ein großes Anwendungsgebiet biotischer Dämmstoffe ist im Sinne des „Weiterbauens“ das Sanieren von denkmalgeschützten Gebäuden. Um Bauschäden in historischen Gebäuden zu vermeiden, sollten hier Materialien eingesetzt werden, die sich innerhalb des bestehenden konstruktiven und bauphysikalischen Systems bewegen und ähnliche Eigenschaften wie die Bestandsstruktur aufweisen.

Im Folgenden wird eine kurze Übersicht der Anwendungsmöglichkeiten von nachhaltigen Dämmstoffen vorgestellt:

Dämmstoffplatten sind formstabil und auf Druck belastbar. Sie werden flächig verlegt und mittels einer Nut und Feder oder Stufenfalz miteinander verbunden. Sie eignen sich zur Anwendung als Fassaden-, Dach- und Trittschalldämmung. Typische biotische Materialien zur Herstellung von Dämmplatten sind Holzfaser, Holzwolle, Hanf, Stroh, Thypha (Rohrkolben) und Kork.



Abbildung A1.40: Holzweichfaserplatte [Isover]

Dämmstoffmatten und Filze sind flexibel, nicht druckbelastbar und eignen sich daher besonders für das Ausstopfen konstruktiver Hohlräume in Dächern, Wänden und Decken. Die Matten können unter anderem aus Holzfasern, Zellulose, Hanf, Schafswolle, Kork, Flachs oder Jute gefertigt werden



Abbildung A1.41: Jutedämmung Foto: Thermo Natur  
[Thermo Natur]

Für die Anwendung in ungebundener Form als Schütt- oder Einblasdämmung für konstruktive Hohlräume eignen sich Holzspäne, Stroh, Korkschrot, Zelluloseflocken, Hanffasern, Seegrass und Leichtlehm.



Abbildung A1.42: Einblasdämmung aus Holzspänen  
[Wikimedia, Przykuta.]

Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) können aus einer Holzfaser-, Kork- oder Strohdämmung bestehen und stellen eine nachhaltige Variante zu herkömmlichen erdölbasierten WDVS dar.

### 2.1.10 Recycling

Baumaterialien sollten allgemein eine möglichst hohe Lebensdauer aufweisen. Kommt es zum Rückbau, bieten schadstofffreie, einstoffliche und biotische Materialien vielfältige Recyclingmöglichkeiten, wie eine Wiederverwendung oder Kompostierung.

Die Wiederverwendung von Naturdämmmaterial ist grundsätzlich möglich, insofern sie sich rückstandslos und zerstörungsfrei aus der Konstruktion lösen lassen und die Gebrauchstauglichkeit gewährleistet ist. Beispielsweise könnten Zellulose-Flocken und Holzspäne aus den konstruktiven Hohlräumen abgesaugt und wiederverwendet werden. Diese Form des Recyclings findet jedoch aufgrund des Rückbauaufwandes in der Regel nicht statt. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die naturbelassen und chemisch unbehandelt sind, können auf natürlichen Wegen kompostiert, biologisch abgebaut und wieder Teil des natürlichen Nährstoffkreislaufs werden. Sind biotische Dämmstoffe mit chemischen Zusätzen versehen, ist dies folglich nicht möglich. In der Regel kommt

es aufgrund eines hohen Heizwerts daher zur thermischen Verwertung von Dämmstoffen (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 86-90).

Um zukünftig eine rohstoffeffiziente und kreislaufgerechte Nachnutzung, im besten Fall in Form einer Wiederverwendung oder einer Kaskadennutzung, biotischer Dämmstoffe gewährleisten zu können, sollten sie materialgerecht eingebaut und am Ende der Gebrauchszeit rückstandslos rückbaubar sein.

## **2.2 Bekleidung und Beplankung**

### **2.2.1 Einleitung**

Seit den Anfängen des Bauens nutzten Menschen die lokal verfügbaren Ressourcen, wie Holz, Lehm, Stroh und Naturstein, um Gebäude von außen wie von innen auszukleiden. Dabei sind die Anforderungen an die Verkleidung seit je her sehr unterschiedlich und reichen von gestalterischen, über konstruktive bis zu bauphysikalischen Aspekten.

### **2.2.2 Außenwand**

Die äußere Gebäudehülle prägt maßgeblich das Erscheinungsbild und den architektonischen Ausdruck eines Gebäudes. Dieser Ausdruck wird aus der geometrischen Form, Proportionen, dem Spiel aus Licht und Schatten, dem Verhältnis von Öffnungen und geschlossenen Flächen und der Materialität und seinen spezifischen Eigenschaften geschaffen. Neben gestalterischen Aspekten hat die äußerste Schicht der Gebäudehülle hohe bauphysikalische und technische Anforderungen, wie die Beständigkeit unter Witterungseinfluss, Brand-, Einbruch-, Wärme- und Schallschutz und weitere, standortspezifische Anforderungen. Witterungsbedingte Alterungsprozesse von Materialoberflächen sollten bei der Materialwahl ebenfalls berücksichtigt werden. Während einem gut geschützten Tragwerk eine Lebensdauer von 50 Jahren zugesprochen wird, ist der Austausch oder die Ertüchtigung der Außenhülle bereits nach spätestens 25 Jahren notwendig. In Abhängigkeit der Materialwahl und Fassadenkonstruktion ist das mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 80).

Die Vielfalt, der für die Außenhülle in Frage kommenden Materialien lässt sich in folgende Materialgruppen unterteilen:

- Biotischen Materialien, wie z.B.: Massivholz, Thermoholz, Holzwerkstoffplatten, Reet, Kork
- Metallische Materialien, wie z.B.: Edelstahl, Stahl, Aluminium, Zink, Kupfer
- Fossile Materialien, wie z.B.: Polycarbonat
- Mineralischen Materialien, wie z.B.: Natur-, Kalksteine, Beton- und Ziegel- und Glaswerkstoffe, Putz

Darüber hinaus unterscheiden sich die Materialien hinsichtlich der Anforderung an die Unterkonstruktion. Holz, Kunststoff und Metallbleche haben aufgrund ihres geringen Eigengewichts keine hohen Ansprüche an die Unterkonstruktion im Vergleich zu mineralischen Fassadenelementen. Andererseits haben mineralische Fassadenverkleidungen bei fachmännischer Ausführung eine höhere Beständigkeit als bewitterte Materialien wie Holz und Kunststoff.

Unter Berücksichtigung des flächenmäßig großen Anteils der Gebäudehülle und der materialbedingt begrenzten Lebensdauer, kommt der Betrachtung von langlebigen aber auch ökologischen und ressourcenschonenden Materialien, die ein hochwertiges Nachnutzungspotential aufweisen, eine besondere Bedeutung zu.

Aufgrund der großen Material- und Produktvielfalt werden die wesentlichen Vor- und Nachteile der Materialgruppen anhand von Beispielen im Folgenden aufgeführt. Die beschriebenen Eigenschaften der einzelnen Materialgruppen können je nach Rohstoff abweichen.

ökologischen Vorteile von biotischen Rohstoffen sind, wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert, umfassend. Während Kork und Reet als Fassadenbekleidung Nischenprodukte darstellen, findet Holz deutlich häufiger in unterschiedlichster Form Verwendung. Holzprodukte können beispielsweise als Schindeln, Lamellen oder Platten ausgeführt werden und aus Massivholz, Thermoholz oder Holzwerkstoffen gefertigt werden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Langlebigkeit, Witterungsbeständigkeit und optischen Alterung (zu gräulich, orange oder schwarz, je nach Holzart).

Vollholzprodukte sollten im gelagerten und eingebauten Zustand möglichst trocken gehalten werden (max. Luftfeuchten bis 70 %, max. Holzfeuchte bis 20 %), um es vor Schädlingen, wie Pilzen und Insekten, zu schützen. Die Gebrauchsklasse gibt eine Übersicht darüber, inwiefern ein Holzschutz in Abhängigkeit der Einbausituation erforderlich ist. Konstruktiver Holzschutz, wie ein Dachüberstand oder eine abgesetzte Sockelzone, schützen das Material vor Witterungseinflüssen, wie permanenter Feuchtigkeit und Spritzwasser. Ein vorbeugender Holzschutz kann mittels naturbasierter Öle, einer thermischen Behandlung (Thermoholz) oder kontrollierter Ankohlung der Holzoberfläche hergestellt werden. Oberflächenbehandlungen müssen je nach Ausrichtung der Fassade alle 2-5 Jahre erneuert werden. Auf die Anwendung von chemischen Behandlungen, wie Kunstharzlacke und Biozide, sollte im Interesse einer potenziellen Kaskadennutzung und besseren Umweltverträglichkeit verzichtet werden.



Abbildung A1.43: Holzschalung

[<https://www.baunetzwissen.de/fassade/fachwissen/materialien/holz-154459.>]

Großformatige Sperr- und Furnierschichtholzplatten zählen zu den Holzwerkstoffen, die im sichtbaren Außenbereich einsetzbar sind. Für die Herstellung der Plattenwerkstoffe werden mehrlagige Nadel- oder Laubholzfurniere mittels wasserfester und duroplastischer Bindemittel miteinander verklebt. Der verwendete Klebstoff sollte aus ökologischen und gesundheitlichen Gründen einen möglichst geringen Formaldehydanteil aufweisen (vgl. Kap. 1.1.5) Um auf einen zusätzlichen Oberflächenschutz, z.B. in Form von Lacken verzichten zu können, sollten Plattenstärken, ab ca. 25mm eingesetzt werden. Das ermöglicht die Verwendung von Furnierlagen mit einer höheren Beständigkeit. Sperr- und Furnierholz werden bislang ausschließlich aus Hölzern aus primärer Rohstoffquelle hergestellt (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 73).





Abbildung A1.44: Mehrschichtholzplatte [Informationsdienst Holz]

Kompositmaterialien mit hohem Holzanteil, wie beispielsweise HPL-Platten, bedürfen durch ihre Acryl-Urethan-Beschichtung zwar keines weiteren Holzschutzes, weisen allerdings durch ihren hohen Produktionsaufwand und Klebstoffanteil, sowie den Ausschluss von anschließendem Recycling eine deutlich schlechtere Ökobilanz auf als Vollholzprodukte.

Die Herstellung von metallischen Fassadenelementen ist mit einem hohen Energieeinsatz in der Produktion, sowie (sofern aus Primärquelle) mit irreversiblen Eingriffen in die Umwelt bei der Rohstoffgewinnung verbunden. Dies wirkt sich negativ auf den ökologischen Fußabdruck aus. Im Bereich der Fassade werden metallische Verkleidungen jedoch materialsparend eingesetzt, da die Produkte in der Regel nur wenige Millimeter stark sind. Metallische Fassadenelemente zeichnen sich zudem durch eine große Langlebigkeit und Pflegeleichtigkeit aus. Die Witterungsbeständigkeit hängt unter anderem vom Korrosionsschutz ab. Dieser kann durch eine Legierung oder Beschichtung hergestellt werden. Metallische Produkte haben außerdem ein großes Recyclingpotential: Sie können bei sortenreiner Trennung eingeschmolzen und mit minimalem Qualitätsverlust wiederverarbeitet werden.

Herstellbar sind Bekleidungsbleche in jeder gewünschten Form, sie können lösbar mit der Unterkonstruktion verschraubt oder verkantet werden.

Fossile Materialien, wie Polycarbonatplatten, kommen in Form von transluzenten und großformatigen, hohlen Fassadenplatten zur Anwendung. Die Vorteile liegen in niedrigen Material- und Produktionskosten, wärmedämmenden Eigenschaften und einem sehr geringen Materialgewicht. Jedoch ist die Lebensdauer von Kunststoffen unter Witterungseinflüssen begrenzt. Zwar ist ein hochwertiges und mehrfaches Recycling von Polyestern möglich, jedoch kommt es bei einer Kaskadennutzung in der Regel zu einem hohen Qualitätsverlust, beziehungsweise, aufgrund eines hohen Heizwertes, zur thermischen Verwertung.

Mineralische Materialien als Fassadenbekleidung zeichnen sich durch eine hohe Langlebigkeit, Witterungsbeständigkeit, sowie ihre Nichtbrennbarkeit aus. Abgesehen von Naturwerksteinprodukten, haben mineralische Werkstoffe, bedingt durch energetisch aufwendige Herstellungsprozesse, einen relativ großen ökologischen Fußabdruck. Die Trockenmauertechnik mit Natur-Bruchstein hat in Europa eine jahrhundertealte Tradition. Diese Konstruktionsart eignet sich somit sowohl aus ökologischer als auch aus didaktischer Sicht im gegebenen Kontext. Die Vor- und Nachteile von

Natursteinprodukten werden im folgenden Kapitel der Fußbodenoberbeläge näher beschrieben. Bezüglich ihrer Nachnutzung weisen mineralische Materialien durch ihre Beständigkeit grundsätzlich sehr gute Voraussetzungen für eine Wiederverwendung auf. Diese scheitert jedoch unter anderem an einem sehr arbeits- und kostenintensiven Rückbau, da eine zerstörungsfreie und sortenreine Trennung durch Anhaftungen von Mörtel oder Putz stark erschwert wird. Daher kommt es bei der Verwertung von mineralischen Abfällen in der Regel zu einem Downcyclingprozess (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 72-77).

### 2.2.3 Innenwand / Decke

Die raumseitige Bekleidung und Beplankung der Innenwände und Decken beeinflussten maßgeblich den visuellen Raumeindruck, die Raumakustik, die Behaglichkeit und raumspezifische Nutzbarkeit und Orientierung, welche insbesondere für die Haupträume des Museums von großer Bedeutung sind. Darüber hinaus müssen sie weiteren Anforderungen an die Bauphysik, Brandschutz, Installationsführung, Revisionsbarkeit und vielem mehr gerecht werden. Exemplarisch werden hier einige Materialien auf ihre Eignung für Ausstellungsräume ohne besondere Anforderungen untersucht.

Der Raumabschluss im mineralischen Massivbau, insofern die Bauteile nicht in Sichtqualität ausgeführt werden, wird in der Regel durch einen Putzauftrag gebildet. Dafür werden überwiegend Gipsputze eingesetzt. Seit einigen Jahren finden unter Aspekten des „gesunden Wohnens“ zunehmend auch Lehm- und Kalkputze im Innenraum wieder Anwendung.

Im Skelett- und Trockenbau kommen Plattenwerkstoffe zu Anwendung. Auch diese können als Putzträgerplatte dienen oder durch eine Verspachtelung nachbehandelt werden, um Stoßfugen und Unregelmäßigkeiten zu verbergen und eine plane Oberfläche zu erzeugen. Darüber hinaus können in beiden Bauweisen Tapeten, textile Bespannungen, Farbanstriche sowie andere Vorsatzschalen, wie eine Holzvertäfelung, die äußere Bauteilschicht bilden.

Plattenwerkstoffe können eine tragende oder nicht tragende Bauteilschicht darstellen. Sie sind unter anderem für den Feuchtetransport sowie die Winddichtigkeit verantwortlich. Plattenwerkstoffe sind in der Regel lösbar auf einer Unterkonstruktion aus Aluminium oder Holz befestigt. Dadurch entstehende Hohlräume können zur Installationsführung genutzt werden. Zu diesem Zweck werden Plattenwerkstoffe häufig auch vor massiven Wandscheiben in Form einer Vorsatzschale verwendet.

Der Markt der Trockenbaustoffe wird von gipsbasierten Wandverkleidungen, wie Gipskarton und Gipsfaserplatten, dominiert. Die Werkstoffe sind relativ günstig, nicht brennbar und bieten vielseitige Einsatzmöglichkeiten. 60% des Rohstoffs stammen als Nebenerzeugnisse aus der Braun- und Steinkohleindustrie (REA-Gips). Aufgrund des geplanten Kohleausstiegs ist damit zu rechnen, dass diese Rohstoffquelle zukünftig wegfallen und substituiert werden muss, um den Bedarf decken zu können. Die restlichen 40% werden durch Primärrohstoffe, Naturgips, gedeckt. Der Abbau von Naturgips führt zu schädlichen Umwelteingriffen und Flächennutzungskonflikten und ist daher umstritten. Dabei kann Gips im sortenreinen Zustand beliebig häufig recycelt werden. Dies hat jedoch aufgrund günstiger Materialkosten und einem aufwendigen selektiven Rückbau bisher in der Praxis kaum Bestand. Der Recyclinganteil von Gipswerkstoffen liegt daher bei nur 5%, inklusive der Produktionsabfälle (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 81-83).

Plattenförmige Wandverkleidungen aus nachwachsenden Rohstoffen stellen eine Alternative zu mineralbasierten Werkstoffen dar und liefern einen wertvollen Beitrag zum ressourcenschonenden und umweltfreundlichen Bauen.

Im traditionellen Innenausbau stellen Holzschalungen und Vertäfelungen aus massiven Brettern, Bohlen oder Paneelen den inneren Raumabschluss dar. Im Mittelalter boten Holzvertäfelungen im

Innenraum einen zusätzlichen Wärmeschutz. Wandvertäfelungen wurden darüber hinaus zu repräsentativen Zwecken künstlerisch gestaltet. Heute bieten Profilhölzer vielfältige Querschnitte, Oberflächenbehandlungen und Einsatzmöglichkeiten im Innen-, wie auch Außenraum. Sie werden mittels Nut- und Feder-Verbindungen gestoßen und in der Regel in Sichtqualität ausgeführt. Ein weiterer leimfreier Massivholzwerkstoff ist die Massivholz-Diagonalplatte, welche aus mit Schwalbenschwanzverbindungen gefügten Einzeldielen besteht. Die Platte ist diffusionsoffen, winddicht und in sich formstabil und kann daher als aussteifendes Bauteil eingesetzt werden.

Holzwerkstoffplatten stellen aufgrund der großen Produktvielfalt eine flexibel einsetzbare Alternative zu konventionellen Plattenwerkstoffen dar. OSB, Span- und Holzfaserplatten sind hierbei die gängigen Produktgruppen, die aufgrund ihrer hohen Formstabilität und Tragfähigkeit auch als aussteifendes und tragendes Element Anwendung finden und sich teilweise auch für den Einsatz im Feuchtbereich eignen. Holzfaserplatten bieten zusätzliche bauphysikalische Vorteile, wie Wärme- und Schallschutz, sowie Raumlufregulierung. Bei diffusionsoffenen Wandaufbauten ist dabei innen-seitig häufig eine dampfbremsende Ebene notwendig.

Für die Produktion von Holzwerkstoffen werden entweder Industrierundhölzer in Form von schnittfähigem Durchforstungsholz, Nebenerzeugnisse aus der Holzindustrie, wie Hackschnitzel und Späne, oder schadstofffreies Altholz verwendet. Der Bindemittelanteil von Holzwerkstoffplatten variiert zwischen 3-15%. Mit steigendem Bindemittelanteil steigt auch das Gesundheitsrisiko und sinkt die Rezyklierbarkeit des Werkstoffs. Es sollten daher Holzwerkstoffplatten bevorzugt werden, die aus dem holzeigenen Bindemittel Lignin bestehen und einen möglichst geringen Anteil chemischer Bindemittel enthalten (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 80-82).

Ein Beispiel für eine (stark) schadstoffreduzierte Holzwerkstoffplatte ist die diffusionsoffene ESB-Platte der Firma Elka, welche mit dem Blauen Engel Siegel zertifiziert ist und aus harzarmen Fichtenhackschnitzeln aus nachhaltiger Forstwirtschaft hergestellt wird. Als Bindemittel kommt melaminhaltiger Harnstoffleim (MUF) zum Einsatz, welcher ohne Isocyanate, die häufig Allergien verursachen, auskommt und ein Recycling ermöglicht.



Abbildung A1.45: ESB-Platte [Elka]

Als weiterer nachwachsender Rohstoff kann Baustroh unter Die Platte wird mit einer Deckschicht aus Recyclingkarton beklebt, um die Formstabilität sowie eine ebene Oberfläche zu gewährleisten.

Druck und Hitze zu einer Strohbauplatte gepresst werden. Als Bindemittel dient das stroheigene Lignin. Stroh ist ein schnell nachwachsender und regional verfügbarer Rohstoff, der als Nebenprodukt aus dem Getreideanbau bezogen werden kann und daher besonders ökologisch nachhaltig. Strohbauplatten zählen zur Baustoffklasse B2. Das Brandverhalten von Strohbauplatten wird durch die hohe Dichte der gepressten Pflanzenfasern verbessert, sodass dem Feuer Sauerstoff fehlt, um sich schnell auszubreiten. Darüber hinaus haben Strohplatten aufgrund der Aufnahmefähigkeit von überschüssiger Feuchtigkeit eine raumluftheregulierende Wirkung und bieten dank der relativ hohen Dichte für einen guten Schallschutz. Strohbauplatten lassen sich im sortenreinen Zustand dem Produktionskreislauf zurückführen, kompostieren oder energetisch verwerten.



Abbildung A1.46: Strohbauplatte [istraw.]

Plattenwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen können Nachteile im Bereich der Brennbarkeit, Feuchtebeständigkeit und Anfälligkeit gegenüber Schädlingen im Vergleich zu Plattenwerkstoffen aus mineralischen Rohstoffen aufweisen. Daher ist auf den materialgerechten Einbau und Einsatz besonders zu achten. Um den Einsatzbereich zu erweitern und den nachteilhaften Eigenschaften entgegen zu wirken, können den Naturmaterialien chemische oder mineralische Zusätze beige-mischt werden. Diese führen jedoch zu einer Verschlechterung der Ökobilanz und schränken eine stoffliche Nachnutzung, wie eine Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen oder eine Kompostierung, ein.

Ein Kompositprodukt, welches als Akustikpanel im Deckenbereich Anwendung findet, ist die Holz-wollplatte aus Zement und Holzfasern. Sie weist mit ihrer Baustoffklasse B1 einen guten Brand-schutz auf. Ihr Holzanteil ist jedoch mit 20 - 35%, je nach Hersteller, relativ gering. Als Bindemittel wird Zement eingesetzt, welcher Nachteile bezüglich des Gewinnungs- und Herstellungsprozesse, sowie des Recyclings mit sich führt.

Ein ähnlicher Verbundbaustoff mit einer besseren Ökobilanz ist *Hanf-kalk*, bestehend aus Hanf (-schäben) und Kalk als Bindemittel. Hanfkalk ist nur bedingt belastbar und findet in der Regel für die Ausfachung lastabtragender Wände Anwendung. Das Material wird im plastischen Zustand mittels einer Schalung auf der Baustelle verarbeitet. Alternativ gibt es vorgefertigte Formsteine aus Hanf-kalk. Das Material bietet abgesehen von der begrenzten Belastbarkeit viele Vorteile: diffusionsoffen, gut fürs Raumklima, Feuchtaufnahme aus der Raumluft und Akustik, resistent gegen Schimmel, nicht brennbar und am Ende der Nutzungszeit potenziell kompostierbar.

Vollständig kompostierbar, wiederverwendbar und in der Herstellung relativ energiearm im Vergleich zu anderen mineralischen Materialien sind Lehm- bauplatten. Sie bestehen aus Leichtlehm, (vgl. Kap. 1.3) verdanken ihre Formstabilität der Bindekraft der Tonmineralien, die ohne eine zusätzliche Ener-giezufuhr aktiviert werden. Der Aushärtungsprozess des plastischen Lehms funktioniert durch Aus-trocknung an der Luft und durch die Zugabe von Wasser kann das sortenreine Material replastifiziert

und einer weiteren Anwendung zugeführt werden. Die Lehmplatten sind erst ab einer Plattenstärke von 80-125mm selbsttragend und benötigen bei geringerer Stärke eine Unterkonstruktion. Um die Stabilität der Lehmbauplatte zu erhöhen, können Pflanzenfasern aus Stroh oder Flachs dem Lehm beigemischt werden. Diese Pflanzenfasern verändern die Oberflächenqualität des Baumaterials. Da große Lehmbauplatten zur Stabilisierung ein Bewehrungsgewebe verlangen, sollte eine natürliches Gewebe aus Jute oder Schilfrohr einem synthetischen bevorzugt werden, um eine spätere Komposition zu ermöglichen. Kommt es zum Recycling, lassen sich die Gewebe durch Verflüssigen des Lehms rückstandslos trennen. Ein feiner Lehmputz sorgt für einen monomateriellen Bauteilaufbau und begünstigt das spätere Recycling. Lehm bindet aufgrund seines Wasserabsorptionsvermögen nicht nur überschüssige Feuchtigkeit, sondern dank der Tonmineralien auch Schadstoffe und Gerüche aus der Raumluft (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 81).



Abbildung A1.47: Lehmbauplatte [Götz Baustoff- und Renovierungszentrum.]

Weitere Möglichkeiten der Ausbildung der inneren Gebäudehülle bestehen durch *Textilgewebe* als Bespannung von Wänden und Deckenbauteilen. Wandteppiche haben eine lange Tradition in Europa, die bis ins frühe Mittelalter zurückreicht. Sie dienten überwiegend dem Ausschmücken von Räumen und brachten einen schallisolierenden und wärmedämmenden Nebeneffekt mit sich. Wandteppiche waren jedoch bis zur industriellen Produktion von Textilien ein kostbares Luxusgut und daher der wohlhabenden Bevölkerung vorbehalten. Heute können biotische Gewebe aus nachwachsenden Rohstoffen, wie Jute oder Schafsschurwolle eingesetzt werden und auf Unterkonstruktionen aufgespannt werden. Die biotischen Bekleidungen haben schalldämmende Eigenschaften und sorgen für ein gesundes Raumklima. Zudem sind die Naturstoffe am Ende ihrer Nutzungszeit biologisch abbaubar und somit besonders umweltverträglich. Jedoch ist der Einsatz aufgrund der Brennbarkeit im musealen Kontext nur begrenzt möglich (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 83).

Tapeten stellen die häufigste Wandbekleidung im Wohnungsbau dar. Jedoch werden sie im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der tendenziell geringen Relevanz für den Museumsbau nicht näher betrachtet.

## 2.2.4 Fußboden - Oberbodenbelag

Die Entwicklung von Fußbodenbelägen beginnt mit der Errichtung der ersten Behausungen. Als einer der ersten und archetypischen Fußböden gilt verdichtete Erde, beziehungsweise gestampfter Lehm. Auch eine frühe Form des Sichtestrichs fand bereits in der Antike in Form von zementgebundenen Terrazzoböden Anwendung. Darüber hinaus verwenden Menschen seit Jahrtausenden Plattenwerkstoffe aus lokal verfügbaren und einfach zu verarbeitenden Materialien wie Naturstein, Ton, zum Brennen von Keramikfliesen, und den Universalbaustoff Holz. Die Römer machten Keramikfliesen zum Massenprodukt für nahezu jede Bevölkerungsschicht, im Mittelalter wurden Natursteinböden konstruiert, die nicht selten Jahrhunderte unbeschadet überdauern, während der einfache hölzerne Dielenboden für jeden Einsatzzweck geeignet war. Im Rahmen der Entwicklung der Chemieindustrie im 19. und 20. Jahrhundert etablierten sich kunststoffbasierte Bodenbeläge aus PVC und Polyurethan. Linoleum hingegen besteht überwiegend aus Naturmaterialien und ist in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts einer der meistverbauten Fußbodenbeläge in Wohngebäuden. Jedoch wurde Linoleum durch PVC, welches weniger pflegeanfällig und günstiger ist, abgelöst. PVC, Polyurethan und Linoleum haben eines gemeinsam: Sie bieten nahezu uneingeschränkte Gestaltungsmöglichkeiten und können problemlos die Optik von Holz, Marmor oder Terrakotta imitieren. Auch Teppichboden wurde vom einst kostbaren Luxusgut zur industriellen Roll- oder Fliesenware weiterentwickelt. Mit der Entwicklung von Zement- und Betonprodukten (vgl. Kap. 1.2.2), war es möglich, robusten, steinharten Bodenbelag beliebig zu formen und in hoher Stückzahl günstig zu produzieren, wodurch Natursteinprodukte zunehmend ersetzt wurden. Darüber hinaus erweitern Estriche und Asphaltböden das Repertoire an besonders belastbaren Bodenbelägen.

Für jeden Einsatzzweck existiert also eine große Vielfalt an Werkstoffen. Sie lassen sich in 4 Materialgruppen unterteilen:

- Textile Beläge, wie z.B.: Webteppiche, Strickteppiche, Nadelvliessteppiche
- Elastische, nicht-textile Beläge, wie z.B.: Kunststoffbeläge aus PVC (Vinyl), Kautschuk, Linoleum und Kork
- Harte Beläge aus Kunststoffen und Holz, wie z.B.: Laminat, Parkett, Dielen und Holzpflaster
- Mineralische Beläge, wie z.B.: Lehm, Natur(werk)stein, keramische Fliesen, Steinpflaster, Asphalt und Estrich

Die Anforderungen an den Oberbodenbelag im Museumsbau liegen aufgrund einer hohen Frequenzierung durch Besucher sowie potenziell hoher Lasten von Exponaten schwerpunktmäßig im Bereich der Belastbarkeit, Langlebigkeit, Widerstandsfähigkeit und Pflegefreundlichkeit. Die Gebrauchstauglichkeit im Sinne von Rutschfestigkeit und Wärmeübertragung im Falle einer Fußbodenheizung sind ebenfalls Voraussetzungen bei der Materialwahl. Darüber hinaus kann die Oberflächenbeschaffenheit des Fußbodens zur Raumakustik beitragen, die im Museumsbau eine besondere Stellung einnimmt.

Beispielhaft werden im Folgenden einige Fußbodenbeläge aus natürlichen Rohstoffen aufgeführt, die das Potential aufweisen mit geringer Gewinnungs- und Herstellungsenergie auszukommen, potenziell ein geringes Treibhausgaspotenzial mit sich führen sowie in Teilen zu einem gesunden Raumklima beitragen.

Massivholzböden sind sehr belastbar und eignen sich für öffentliche und hoch frequentierte Räume, wie zahlreiche Schul- und Museumsbauten in der Schweiz und Österreich zeigen. Um die Langlebigkeit und das wertige Erscheinungsbild eines hoch beanspruchten Fußbodens zu gewährleisten, ist die Auswahl der Holzart (z.B.: Eiche oder Buche), des Oberflächenüberzugs, (z.B. Hartwachs), sowie die materialgerechte Pflege während der Nutzung zu beachten. In Abhängigkeit von der Stärke und Art des eingesetzten Holzes sowie der Oberflächenbehandlung bieten Holzfußböden

eine hohe Widerstandfähigkeit im Brandfall (Baustoffklasse: normal entflammbar). Darüber hinaus erlauben Massivholzböden eine nachträgliche Bearbeitbarkeit und können problemlos ertüchtigt werden (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 84).



Abbildung A1.48: Stirnholzpfaster [mafi.]

Lehmfußböden sind von einer fugenlosen, ebenen und individuellen Oberfläche geprägt, weisen eine hohe Belastbarkeit auf und stellen eine umweltfreundliche Alternative zu Zementestrich dar. Der erdfeuchte Lehm wird mittels Rüttel- und Vibrationsplatten verdichtet. Im nächsten Arbeitsschritt wird der verdichtete Lehm nachbearbeitet und bei Unebenheiten abgeschliffen. Durch eine homogene Gesteinsdurchmischung, ähnlich wie bei Stampflehmwänden, wird der Boden robust und gegen mechanische Schäden unempfindlich. Während der Abtrocknung schwindet der Lehm Boden und bildet kleine Risse. Diese Mikrorisse befreien den Lehm von inneren Spannungen und machen ihn relativ elastisch. Der vollständig ausgetrocknete Stampflehm Boden kann mit Kasein, Hart-Öl und Hartwachs versiegelt werden und im Anschluss mittels einer Politur behandelt werden. Dadurch wird die Lebensdauer erhöht und eine robuste Oberfläche garantiert. Vielbegangene Oberflächen bedürfen einer regelmäßigen Nachbehandlung mit einem wachshaltigem Pflegemittel. Die Kapelle der Versöhnung (2000) in Berlin zeigt, dass Lehmfußboden bei materialgerechtem Umgang auch für öffentliche Gebäude geeignet ist. Als schwimmende Konstruktion, wird der Fußbodenaufbau deutlich dicker als ein konventioneller Estrich und ist in seiner Tragfähigkeit begrenzt. Stampflehmfußböden können auch im Obergeschoss Anwendung finden. Dabei muss die Lasteinwirkung durch den Verdichtungsprozess beachtet werden. Die Herstellung ist zeitintensiv und technisch anspruchsvoll (vgl. Rauch 2015: 56-64).

Ein weiterer nachwachsender Rohstoff, der sich zur Herstellung eines Plattenwerkstoffes eignet, ist Kork. Korkplatten finden im Bereich der Dämmung oder auch als Fußbodenobermaterial Anwendung. Kork wird aus der Rinde der Korkeiche gewonnen, die etwa alle 10 Jahre geerntet werden kann. Korkeichen wachsen überwiegend in Südeuropa und zählen somit nicht zu den heimischen Hölzern. Die Verfügbarkeit des Rohstoffs ist begrenzt und eignet sich nicht als Massenware. Korkplatten sind formstabil, elastisch und haben sehr gute Schalldämmende Eigenschaften. Das Naturmaterial ist unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit, Fäule, Insekten und Pilzen. Aufgrund seiner hohen Wärmespeicherfähigkeit gilt das Material als sehr angenehm. Korkprodukte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Herstellungsverfahren in Presskork und Backkork. Für die Herstellung von

Presskork kommen zusätzliche Bindemittel zum Einsatz, wohingegen Backkork seine Formstabilität durch den korkeigenen Harz erhält. Aus ökologischer Sicht ist daher Backkork zu bevorzugen. Als Oberfußbodenbelag können hoch verdichtete Korkplatten mit einer Rohdichte von etwa  $600\text{kg/m}^3$  und einer belastbaren Versiegelung auch in öffentlichen Gebäuden eingesetzt werden.



Abbildung A1.49: Stampflehm Boden [Lehm Ton Erde.]

Naturstein ist in Form von Platten oder Steinen nahezu beliebiger Abmessungen ein Fußbodenbelag von besonders hoher Belastbarkeit, Langlebigkeit und zudem schadstofffrei. Im Vergleich zu Kunststeinen, beispielsweise aus Keramik oder Beton, führt Naturstein, in Abhängigkeit des Steinvorkommens und dem Maschineneinsatz, das Potenzial mit sich, ein geringes Treibhausgaspotenzial aufzuweisen. In Deutschland werden 200-250 Steinbrüche betrieben, je nach Region mit unterschiedlichen Steinarten, wie Granit, Schiefer oder Kalksteine. In der Region um Detmold ist vor allem Kalksandstein verfügbar. Auf die Regionalität des Natursteins, unter Berücksichtigung von Umwelt- und Naturschutz, zu achten, ist von großer Bedeutung, da aktuell Naturstein zu einem großen Teil aus China importiert wird und durch diesen Transport die  $\text{CO}_2$ -Emissionen deutlich ansteigen. Hinzu kommt die Ausbeutung von Mensch und Umwelt, die mit unbedachtem Umgang mit Naturstein einhergeht. Um dies zu vermeiden, sollten daher ausschließlich zertifizierte Baustoffe genutzt werden. Regional und nachhaltig abgebauter Naturstein ist jedoch mit relativ hohen Kosten verbunden.

Die Nachnutzung von Natursteinprodukten ist bei einem zerstörungsfreien Rückbau in Form einer Wiederverwendung möglich. Unbrauchbare Natursteinprodukte können zerkleinert und in ungebundener Form oder als Betonzuschlag Anwendung finden. Um eine hochwertige Nachnutzung nicht einzuschränken und Auswaschungen von Schadstoffen ins Grundwasser zu vermeiden, sollte auf eine Imprägnierung oder Beschichtung des Natursteins verzichtet werden (vgl. Dachverband Entwicklungspolitik Baden-Württemberg (Hrsg.) 2014: 4-9).





Abbildung A1.50: Natursteinplatten [NGR Natursteingesellschaft]

Ein deutlich jüngeres Produkt auf natürlicher Basis bildet Linoleum. Bei der Herstellung von Linoleum werden Leinöl, Tallöl und Naturharz vermischt und reagieren zu sogenannten Linoleumzement. Weitere Zusatzstoffe kommen in folgenden Verarbeitungsschritten zur Optimierung der Licht- und Farbbeständigkeit zum Einsatz: Korkmehl, Calciumcarbonat, Rezyklat aus Linoleum, Holzspäne, Titanoxid und Pigmente. Zur Stabilisierung findet ein Trägermaterial aus Jutegewebe Anwendung. Auch wenn Linoleum ohne eine Oberflächenbeschichtung auskommen kann, weisen die meisten Produkte eine Oberflächenbehandlung aus Polyurethan auf. Das Material ist sehr robust, dauerhaft und kommt ohne Chemikalien wie Lösungsmittel und Weichmacher aus und ist daher gesundheitlich unbedenklich. Bei einer Materialstärke von nur 4,0mm ist der Bodenbelag bereits für starke Beanspruchungen, wie Sport oder Lagerhallen, geeignet. Das Naturmaterial ist jedoch nicht für den Einsatz in Nassbereichen geeignet. Eine recyclingfreundliche und lösbare Alternative zu gängigen verklebten Bahnware sind Fliesen oder Fußbodenpaneele auf einer Trägerplatte, die mittels eines Nut-und-Feder-Prinzips untereinander verbunden und schwimmend verlegt werden (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 86).

Diese Einbauart kann die Lösbarkeit, die Revisionierbarkeit und eine sortenreine Rückbaubarkeit begünstigen.

Eine umweltfreundliche Alternative zum erdölbasierten Polyurethan stellt Bio-Polyurethan auf Pflanzenölbasis, dar. Die Produktlinie Purine Bio-Boden mit Ecuran, ein Bio-Polyurethan auf Raps- und Rizinusölbasis, ist frei von Chlor, Weichmachern und Lösungsmitteln und Cradle-to-Cradle“-zertifiziert. Das Produkt existiert als Plattenware zum Kleben und als Klicksystem (vgl. Grimm 2020).

Teppichbodenbeläge können aus biotischen Materialien (Naturfasern) wie Sisal bestehen, weisen in vielbegangenen Bereichen jedoch eine begrenzte Lebensdauer von etwa 10 Jahren auf und müssen daher regelmäßig ausgetauscht werden. Aus diesem Grund sind sie für die repräsentativen

Räume im musealen Kontext tendenziell ungeeignet und werden nicht näher betrachtet (vgl. Hillebrandt et al. 2018: 84).

Weitere traditionsbehaftete Fußbodenbeläge aus natürlichen, aber nicht-nachwachsenden Rohstoffen, die anders als beispielsweise Lehmböden, mit einem relativ aufwendigen und energieintensiven Herstellungsprozess einhergehen, sind u.a. keramische (Terrakotta-)Fliesen und Terrazzoböden. Beide Bodenbelagstypen waren aufgrund ihrer Langlebigkeit und Belastbarkeit bereits in der Antike weit verbreitet und fanden spätestens mit der Ausbreitung des römischen Reiches ihren Weg nach Westeuropa.

Die Herstellung von keramischen Fliesen und Platten beruht überwiegend auf der Verwendung der folgenden Rohstoffe: natürliche Tone, Sand, Quarzsand, Schamotte und Feldspat sowie andere Zusätze, die u.a. als Farbstoff fungieren. Die Produktion basiert auf der Aufbereitung des Rohmaterials, einer Trocknung und Formgebung sowie des anschließenden Brennens in Rollen- oder Tunnelöfen. Mit steigenden Temperaturen kann die Dichte und Härte des Keramikproduktes beeinflusst werden. Beispielsweise werden Steingutprodukte und Terrakottafliesen bei Temperaturen von ca. 900-1100°C und Steinzeug bei Temperaturen von ca. 1.150-1300°C gebrannt. Eine Versiegelung der Oberfläche kann bereits im ersten Brennvorgang inbegriffen sein (Einbrandverfahren). Ein nachträglichen Glasurauftrag setzt wiederum einen zweiten Brennvorgang (Zweibrandverfahren) voraus. Im Sinne eines CO<sub>2</sub>-Reduzierten Bauens sollten Keramikprodukte Verwendung finden, die einen möglichst energiereduzierten Herstellungsprozess aufweisen und wenn möglich, einen einfachen Brennprozess aufweisen. Im Sinne eines recyclingoptimierten Rückbaus, können Keramikfliesen alternativ zur klassischen Verlegeart in einem Mörtelbett als loses Nut-und-Feder-System eingebaut werden.

Nachdem das antike Bauwissen mit dem Untergang des römischen Reiches weitgehend verloren ging, erfuhren Terrazzoböden während der Gründerzeit eine Renaissance und fanden in verschiedenen Bauaufgaben, von Bahnhofshallen bis zu Eingangsbereichen von Wohngebäuden, Anwendung. Die Oberfläche von vergossenen Terrazzoböden wird durch die Auflage dekorativer und farbiger Zuschlagstoffe (traditionell: Marmor, Dolomit und Kalkstein) auf einen noch plastischen und in der Regel zementbasierten Estrich gebildet. Durch eine Nachbehandlung (Schleifen und Politur) erhält der Boden seine charakteristische, glänzende und zierreiche Oberfläche. Terrazzoböden zeichnen sich zudem durch eine hohe Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Im Sinne des ökologischen Bauens und hinsichtlich der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Kapitel 4.1.2 „Ökobeton“, sollte für die Rezeptur eines Terrazzobodens oder eines (Sicht-)Estrichs ein CO<sub>2</sub>-reduziertes Bindemittel zur Anwendung kommen.

### **2.2.5 Recycling**

Die Rückbaufähigkeit und damit sortenreine Trennung der verbauten Stoffe ist eine wesentliche Voraussetzung für eine ökologisch sinnvolle Nachnutzung. Sie wird durch konventionelle Fügetechniken, wie Verkleben, und Versiegelungen oder Verputzen stark erschwert. Wann immer möglich, sollten daher lösbare Systeme (z.B. Klicksysteme) mit einer Unterkonstruktion verwendet werden.

Ein hochwertiges Recycling wird zudem begünstigt, wenn die verwendeten Materialien eines Bauteils aus derselben Stoffgruppe stammen. Bestenfalls kann dadurch auf einen zeitintensiven Rückbau einzelner Material- und Bauteilschichten verzichtet werden.

– Anhang A2 –

Arbeitsgruppe 2 Bauklimatik

1 Raumklimasimulationen

1.1 Randbedingungen Raumklimasimulationen

1.1.1 Klima: Kassel Testreferenzjahr (2004)

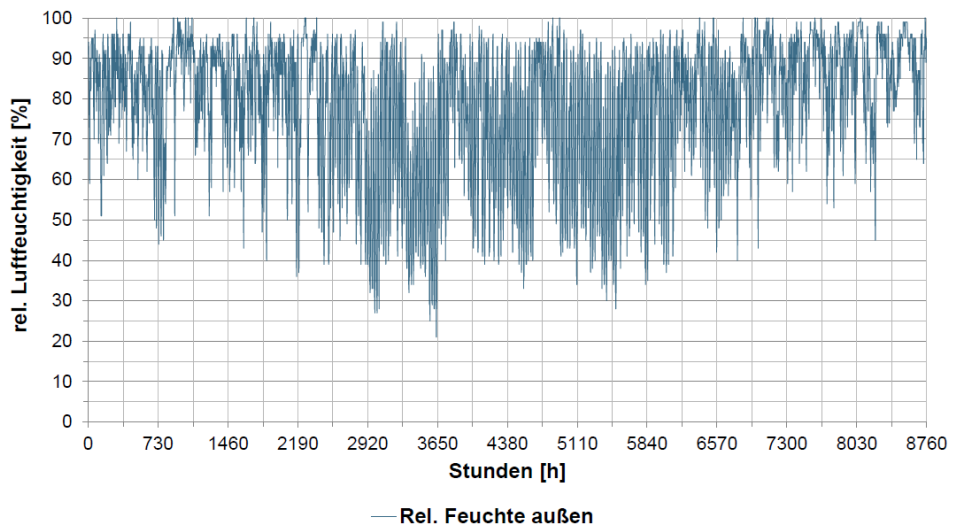


Abbildung A2.1: Jahresübersicht der relative Feuchte Außenluft (Kassel Testreferenzjahr 2004)

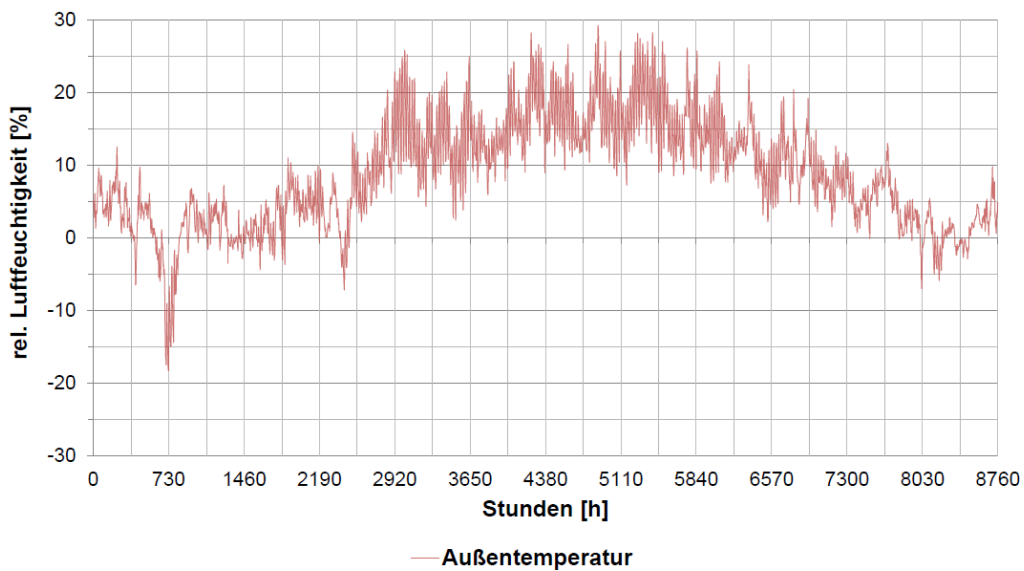


Abbildung A2.2: Jahresübersicht der Temperatur der Außenluft (Kassel Testreferenzjahr 2004)

## 1.1.2 Modell

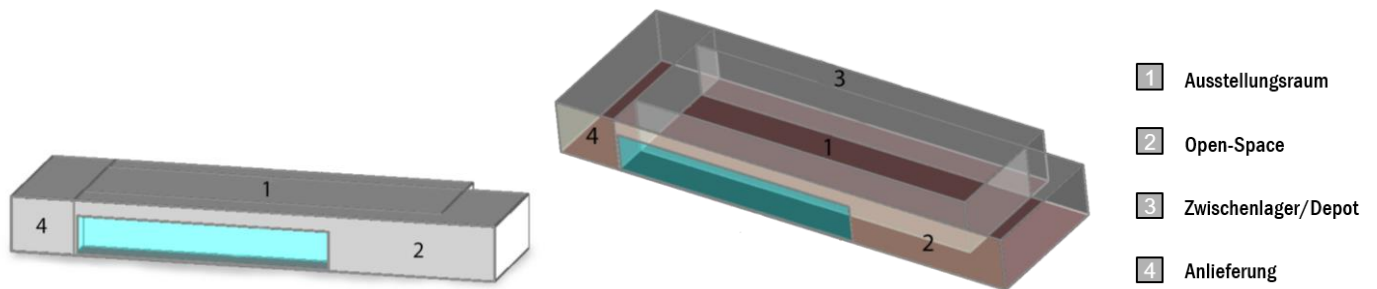


Abbildung A2.3: Außenansicht mit Raumordnung des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus

Dargestellte Zonen:

1. Ausstellungsraum
2. Multifunktionsbereich „Open Space“
3. Depot/Lager
4. Anlieferung

Angrenzende Bereiche des Ausstellungsraums und Randbedingungen:

- über variierte Trennwände (ca. 450 m<sup>2</sup>) an Multifunktionsbereich „Open Space“ mit Innentemperatur von 20°C,
- über variierte Trennwände (ca. 450 m<sup>2</sup>) an adiabates Depot/Zwischenlager,
- über Betonwand an Anlieferungsbereich mit Innentemperatur von mindestens 15 °C, außen-temperaturabhängig,
- über gedämmte Bodenplatte mit schwimmendem Estrich zum Erdreich (ca. 890 m<sup>2</sup>); U-Wert = 0,12 W/m<sup>2</sup>K,
- Dach als nichtbelüftete Konstruktion (890 m<sup>2</sup>); U = 0,12 W/m<sup>2</sup>K

## 1.2 Klimasimulation zur Bauteilausbildung: Parameterstudie Trennwände des Ausstellungsraums zum Open-Space-Bereich und zum Depot (Abschlussbericht 5.6.4.2)

Im Museumsgebäude soll trotz aller Anforderungen an Komfort für Besucher und Mitarbeiter und an die Bereitstellung konservatorischer Verhältnisse mit vergleichsweise geringeren haustechnischen Maßnahmen ein möglichst ausgeglichenes Raumklima herrschen. Dies ist nur durch den Einsatz von Materialien mit hoher Feuchte- und Wärmespeicherfähigkeit möglich, so dass von außen einwirkende klimatische Störgrößen in ihrer Wirkung auf die klimatische Situation im Raum abgemildert werden. Auch schwankende Wärme- und Feuchtelasten, die im Innern auftreten, werden somit kurz- und mittelfristig in Baustoffen zwischengespeichert und zu späteren Zeitpunkten wieder freigegeben.

Die folgenden Abbildung A2.4 bis Abbildung A2.9 zeigen Verläufe der Temperatur und der relativen Feuchte der Innenluft im Ausstellungsbereich bei Variation der Trennwandkonstruktionen dem zwischen Ausstellungsraum und Open-Space-Bereich bzw. Depot. Die Gesamtfläche der hier betrachteten beiden Trennwände der Ausstellung beträgt ca. 900 m<sup>2</sup>; diese werden innerhalb der Simulationsstudie entweder als 30cm Sichtbetonwand, als 60cm Stampflehmwand oder hybrid als 30cm Betonwand mit 2cm Lehmputz modelliert; die restlichen raumabschließenden Oberflächen werden – wie im modernen Museumsbau häufig anzutreffen – aus Beton bestehend angenommen. Während der Öffnungszeiten sind ständig 20 Personen im Raum, was einen personenbedingten nichtkonditionierten Außenluftvolumenstrom von 400 m<sup>3</sup>/h bedingt. Abgesehen von einer komfortbedingten Beheizung auf 20°C wird keine weitere Temperierung oder Luftbehandlung innerhalb der Berechnungen angesetzt.

Insgesamt zeigen die Simulationen ein recht ausgeglichenes Raumklima, was angesichts der hier vorausgesetzten moderaten Besucherzahlen und der fehlenden solaren Lasten des fensterlosen Raums zu erwarten ist. Da alle drei hier untersuchten Trennwandtypen massiv aus Beton bzw. Lehm bestehend angenommen sind, werden aufgrund ähnlicher, sehr hoher Wärmespeicherfähigkeiten kaum Unterschiede im Jahresverlauf der Innenlufttemperatur (Abbildung A2.4) erkennbar; die Verläufe der relativen Innenluftfeuchte (Abbildung A2.5) prognostizieren stärkere Abweichungen, da die Feuchtespeicherfähigkeit des Lehms deutlich höher einzuschätzen ist als die des Betons.

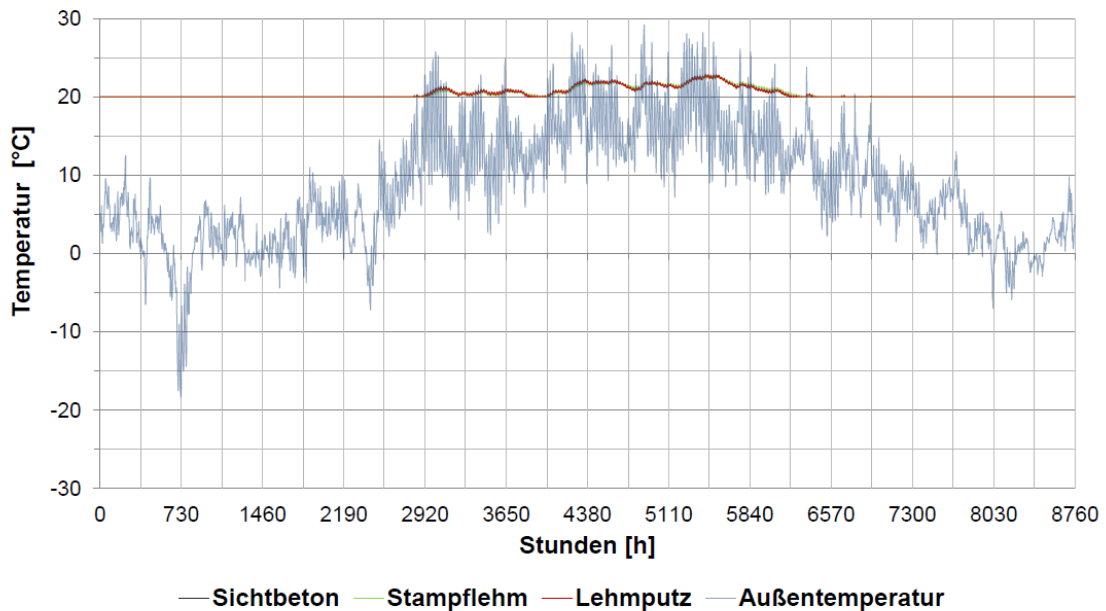


Abbildung A2.4: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen

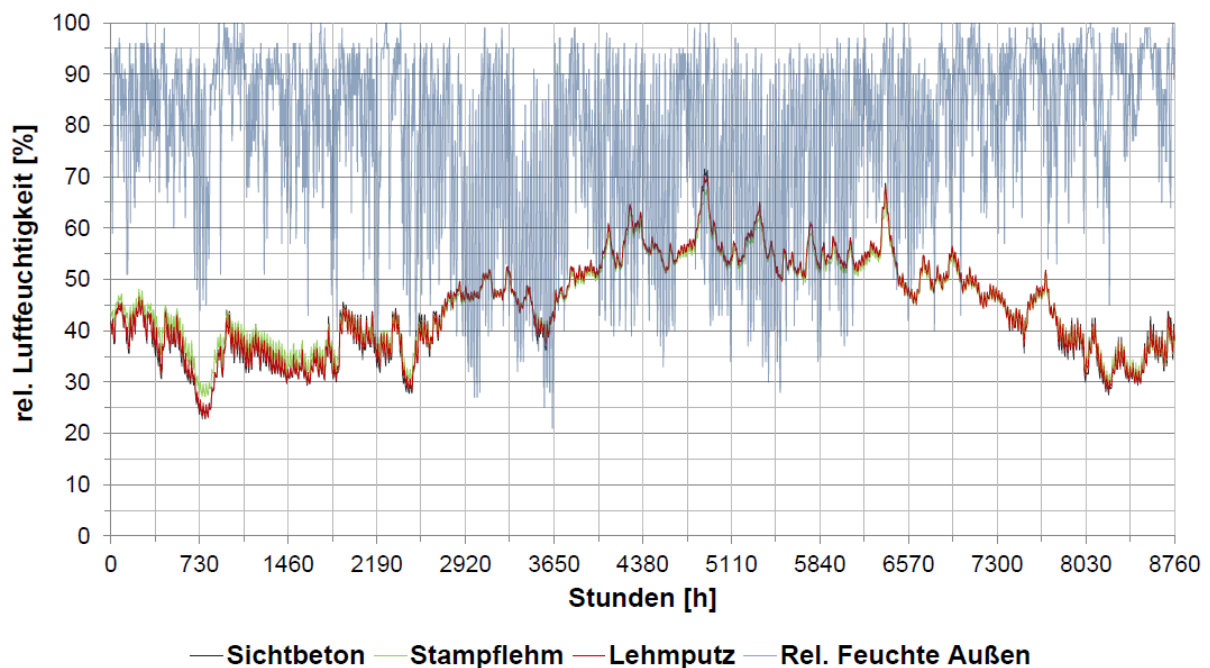


Abbildung A2.5: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen

Die Wochenverläufe stellen die Situation bei Anbruch einer Kälteperiode dar (Abbildung A2.6 und Abbildung A2.7). Dank Beheizung auf 20°C Lufttemperatur sind die Temperaturverhältnisse in der Ausstellung identisch, die nun stark abnehmende absolute Außenluftfeuchtigkeit führt jedoch im Gebäudeinnern zu sinkenden relativen Luftfeuchten, insbesondere im Raum mit Beton-Trennwänden. Die Simulationsergebnisse spiegeln die feuchtepuffernde Wirkung des Lehms im Unterschied zum Beton bei gleichen Temperaturverhältnissen sehr gut wider. Zwischen beiden Varianten liegen Unterschiede in der relativen Luftfeuchtigkeit von 4...5 %-Punkten. Die lehmverputzte Betonwand verhält sich hier kompromissartig mit einem Verlauf derer zwischen Beton und Lehm mit der Tendenz zum Beton-Verlauf, was bedeuten könnte, dass die Lehmputzschicht dicker sein dürfte, da die Speicherfähigkeit der ersten beiden Zentimeter rasch aufgebraucht ist. Am Ende der betrachteten Woche steigt die Außentemperatur und damit die absolute Feuchte wieder an. Als Folge davon steigt auch die relative Luftfeuchte innen im Fall der Betontrennwände leicht an; die drei Verläufe nähern sich an. Hieran sieht man, dass der verbaute Lehm zur Klimakonstanz im Raum beiträgt.

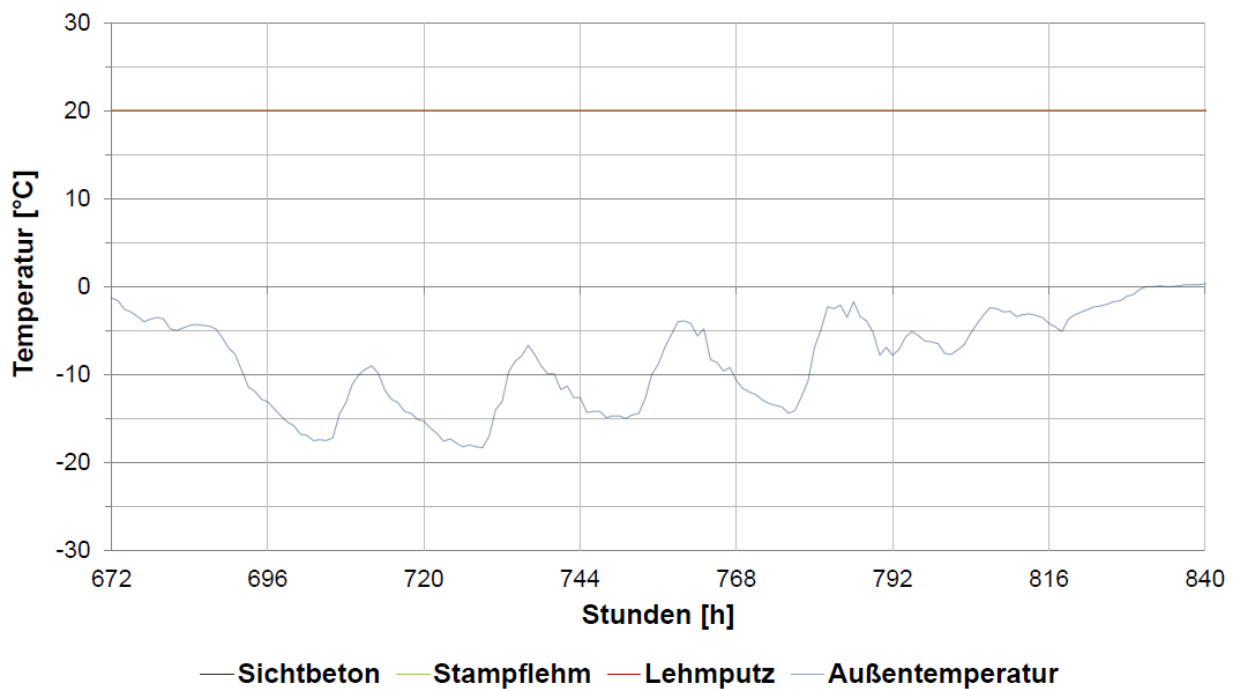


Abbildung A2.6: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen

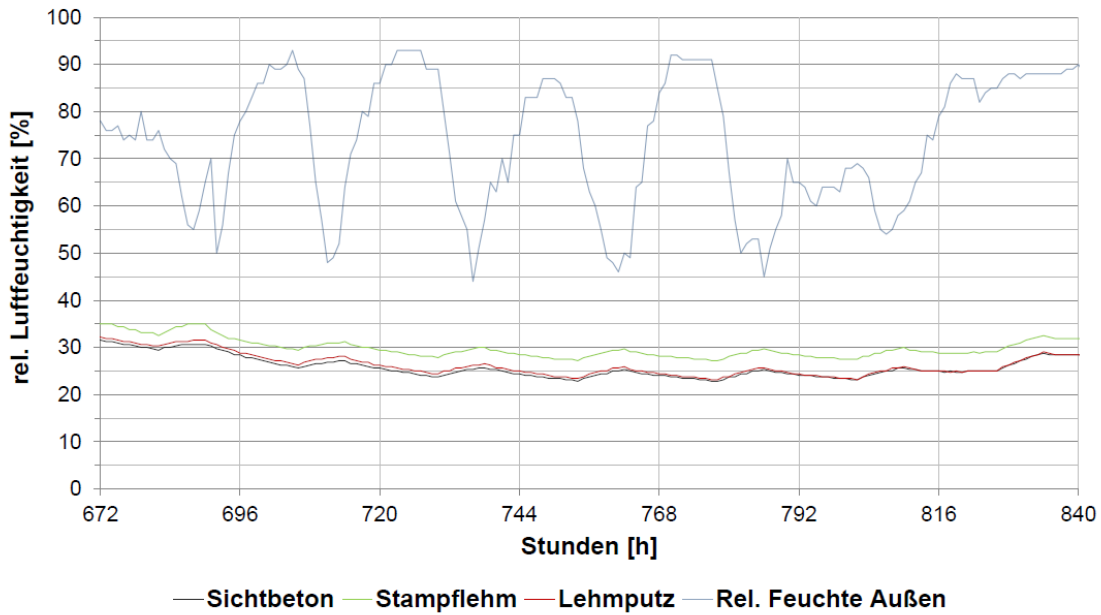


Abbildung A2.7: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für unterschiedliche Trennwandkonstruktionen

Die Innentemperaturverläufe der Sommerwoche auf Abbildung A2.8 beweisen ebenfalls die große Temperaturkonstanz des Raums bei allen Trennwandvarianten aufgrund ihrer Massivität. Die Temperaturen sind quasi identisch. Dennoch lassen sich den Simulationsergebnissen nach - selbst in dieser Heißwetterperiode - gemäßigte Luftfeuchtigkeiten bei Verwendung von Stampflehm gegenüber Beton erkennen: die Unterschiede betragen in dieser Woche zwischen 2 und 5%-Punkte rel. Luftfeuchte. In der zweiten Wochenhälfte sinken Außentemperatur und absolute Luftfeuchtigkeit außen wieder leicht und die Verläufe der Varianten nähern sich an. Das ausgeglichene Klima herrscht bei der Stampflehmvariante.

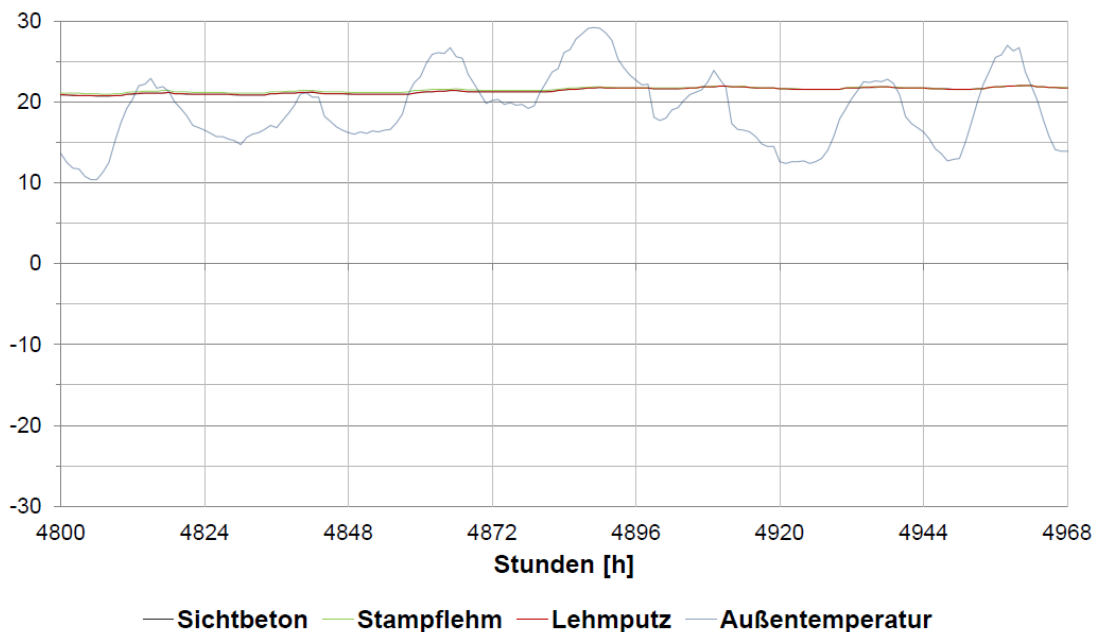


Abbildung A2.8: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedlichen Trennwandkonstruktionen

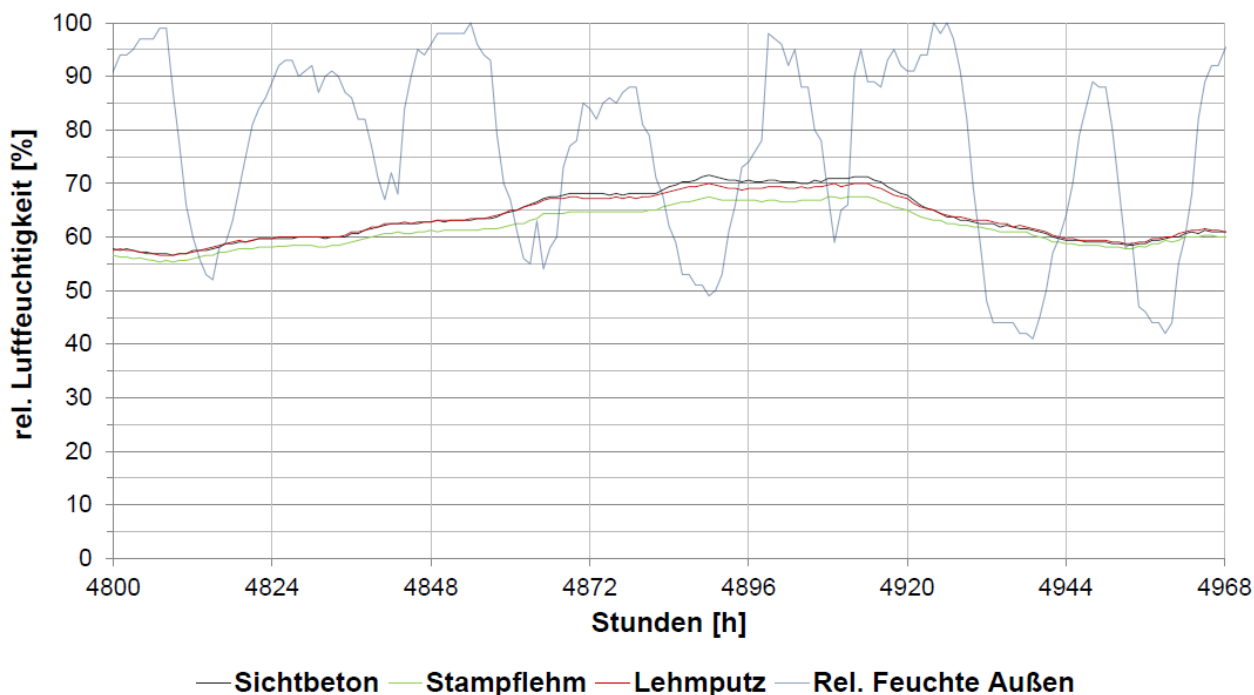


Abbildung A2.9: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum für unterschiedlichen Trennwandkonstruktionen

### 1.3 Klimasimulation zur Bauteilausbildung: Parameterstudie Stampflehmwandstärken (Abschlussbericht 5.6.4.3)

Auch wenn zur Verwendung von wärme- und feuchtepuffernden Materialien wie Lehm im Innenausbau Einigkeit im Zusammenhang mit einem ausgeglichenen Raumklima besteht, ist auch in Forschungskreisen noch Nachholbedarf in der Frage nach sinnvollen, d.h. thermisch-hygrisch aktivierbaren Bauteil- oder Schichtdicken. Wie Kapitel 1.2 gezeigt hat, ist die Verwendung von Stampflehm als (ggf. sogar tragendes) Trennbauteil raumklimatisch günstig. In der folgenden Parameterstudie soll untersucht werden, wie sich eine Trennwanddicke von 20 cm, 40 cm und 60 cm auf die Klimaverhältnisse auswirkt. Wie bei Kapitel 1.2 auch gehen durchgängig 20 Besucher während der Öffnungszeiten von 10-18 Uhr und damit ein Außenluftvolumenstrom von 400 m<sup>3</sup>/h als interne Lasten in die Berechnung ein.

Der Jahrestemperaturverlauf deutet bereits an, dass die Lehmwand mit der geringsten Dicke gegenüber der dicksten Ausführung zu jedem Außenklima die stärksten Schwankungen im Vergleich zeigt (Abbildung A2.10), insgesamt sind diese jedoch sehr klein. Diese Tendenz ist bei der Feuchtekurve in Abbildung A2.11 noch etwas deutlicher ausgeprägt.

Ab Jahresstunde 2500 (Anfang April) etwa braucht nicht mehr viel geheizt werden. Die Außentemperaturen und die Sonnenscheindauer nehmen zu und mit dem nun einsetzenden hochsommerlichen Wetter (ca. Stunde 3000. Ende April) steigen auch die Innenlufttemperaturen im Ausstellungsbereich auf über 20°C an. Wie bereits in dieser Jahresübersicht ersichtlich, ist dieser Anstieg bei der 20cm-Stampflehmwand am größten, was mit der geringen Wärmespeichermasse zu begründen ist. Aufgrund dieser höheren Innentemperatur ist die relative Luftfeuchtigkeit bei der dünnen Wand nun niedriger als bei den Vergleichswänden. Bei langem andauerndem Sommerwetter sind auch die Lufttemperaturen bei den anderen Varianten leicht angestiegen und liegen in etwa auf gleichem Niveau wie im Fall der dünnsten Wand. Feuchtetechnisch sind die Unterschiede jetzt ebenfalls marginal, die Werte liegen wiederum bei der 20cm-Ausführung etwas höher, d.h. sind ganz leicht weniger konstant.



Mit Anfang Oktober (Stunde 6500) fallen die Außentemperaturen wieder, die Heizbetrieb setzt stärker ein. Mit weiter sinkenden Außentemperaturen und absoluten Außenluftfeuchten treten die Luftfeuchteunterschiede der Berechnungsvarianten wieder deutlicher hervor: die Feuchtwerte bei dickeren Trennwände bleiben höher und stabiler.

Die Wochenverläufe bei Beginn der Kälteperiode in Abbildungen Abbildung A2.13 und Abbildung A2.14 zeigen bei infolge Beheizung gleichbleibenden Innenraumtemperaturen von 20°C eine trockenere Innenluft unter Ansatz der 20 cm - Lehmwand. Aufgrund der guten Feuchtespeicherfähigkeit des Lehms scheint die 60 cm dicke Lehmwand während dieser Zeit extrem niedriger absoluten Außenluftfeuchten ein stärkeres Absinken der Innenluftfeuchte durch Feuchteabgabe in Teilen zu verhindern. Von einem höheren Feuchteniveau kommend verharrt die Luftfeuchtigkeit eher, bis die äußeren Verhältnisse sich gegen Ende der Woche wieder normalisieren. Dies verdeutlicht auch der Wochenverlauf der absoluten Feuchtwerte (Abbildung A2.15). Der Luftfeuchteverlauf der 40cm dicken Wand bewegt sich zwischen den anderen Verläufen.

Die Wochenverläufe aller drei Varianten während der Hitzeperiode sind kaum zu unterscheiden. Die Betrachtung der hygrischen Verhältnisse über die absolute Luftfeuchtigkeit zeigt in der Sommerwoche angesichts des hier starken Außenlufttemperatur- und Feuchteanstiegs insgesamt eine leichte Zunahme der Luftfeuchte im Ausstellungsbereich, die aber bei der 20 cm Wand etwas deutlicher ausfällt (siehe etwa Stunde 4910). Dabei handelt es sich aber nur um Größenordnungen von 0,2g/m<sup>3</sup>, also 1-2%-Punkte relativer Luftfeuchte. Eine Interpretation der minimalen Unterscheide wäre in diesem Rahmen aber spekulativ.

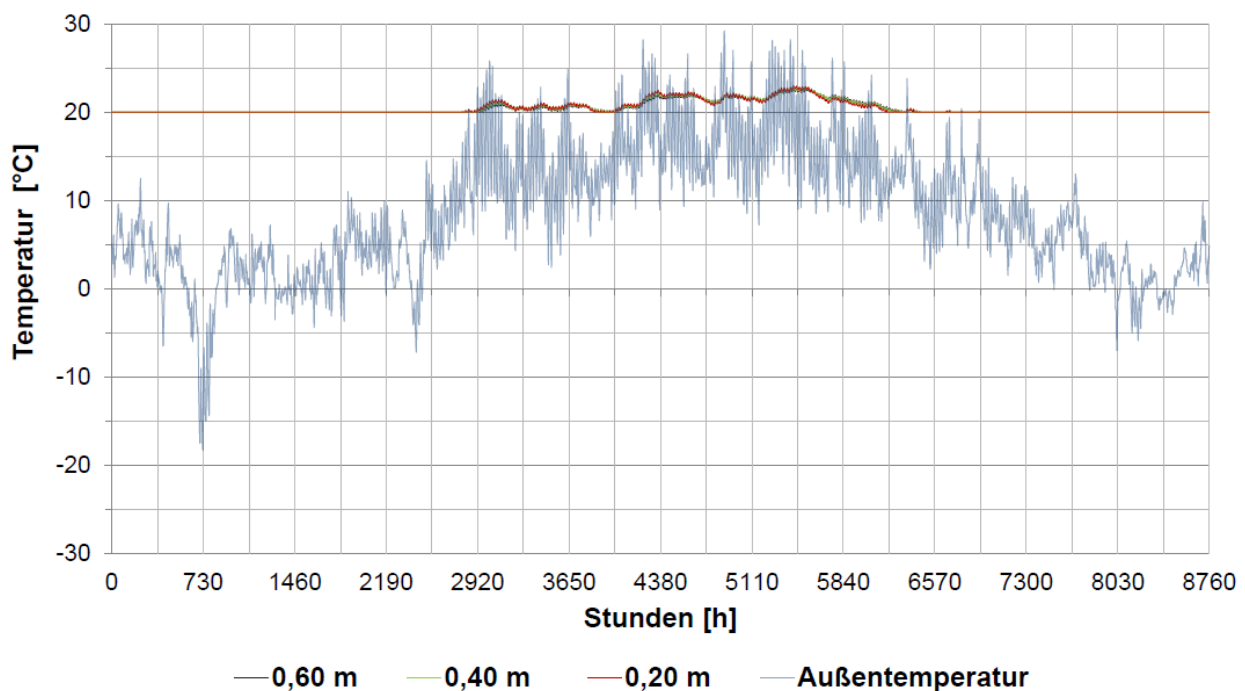


Abbildung A2.10: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

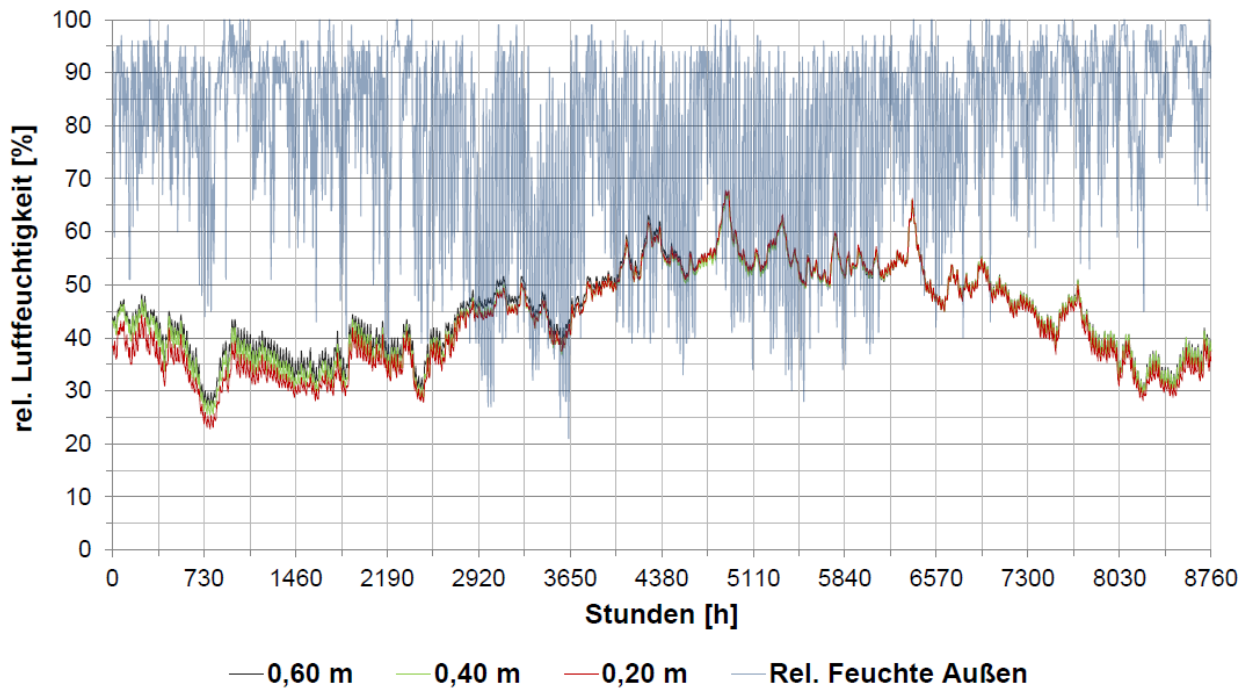


Abbildung A2.11: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmstärken

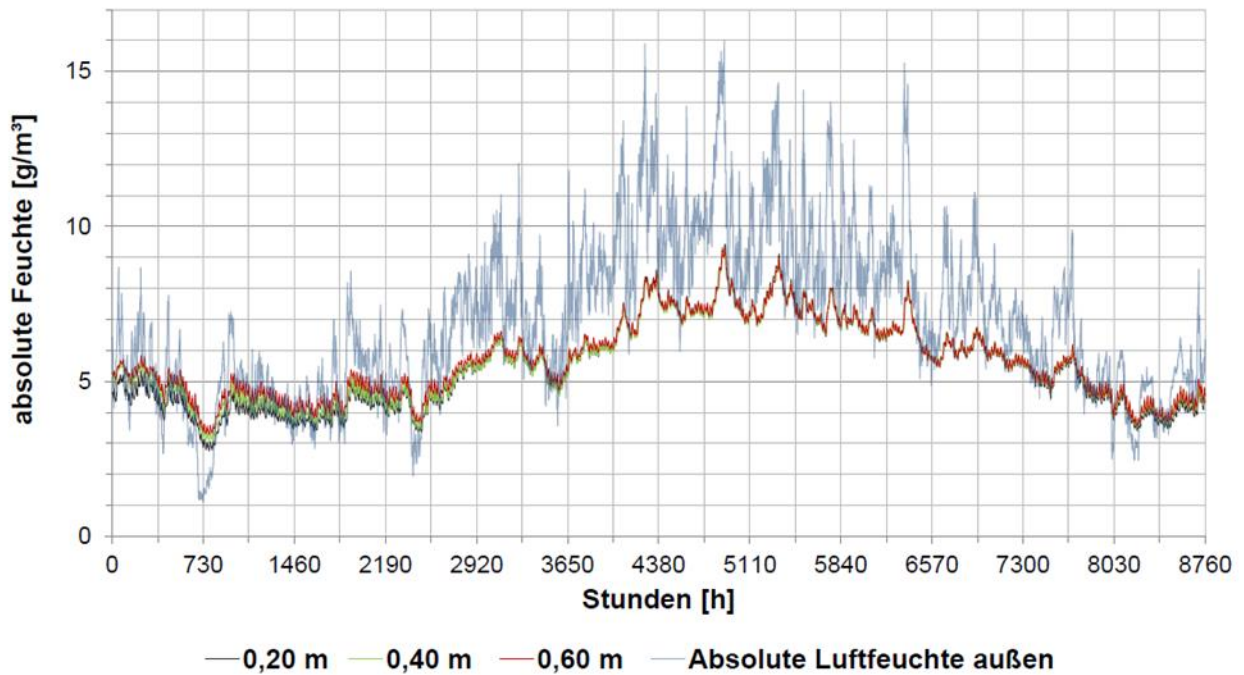


Abbildung A2.12: Jahresübersicht der resultierenden Absoluten Luftfeuchte im Innenraum variiertes Stampflehmwandstärken

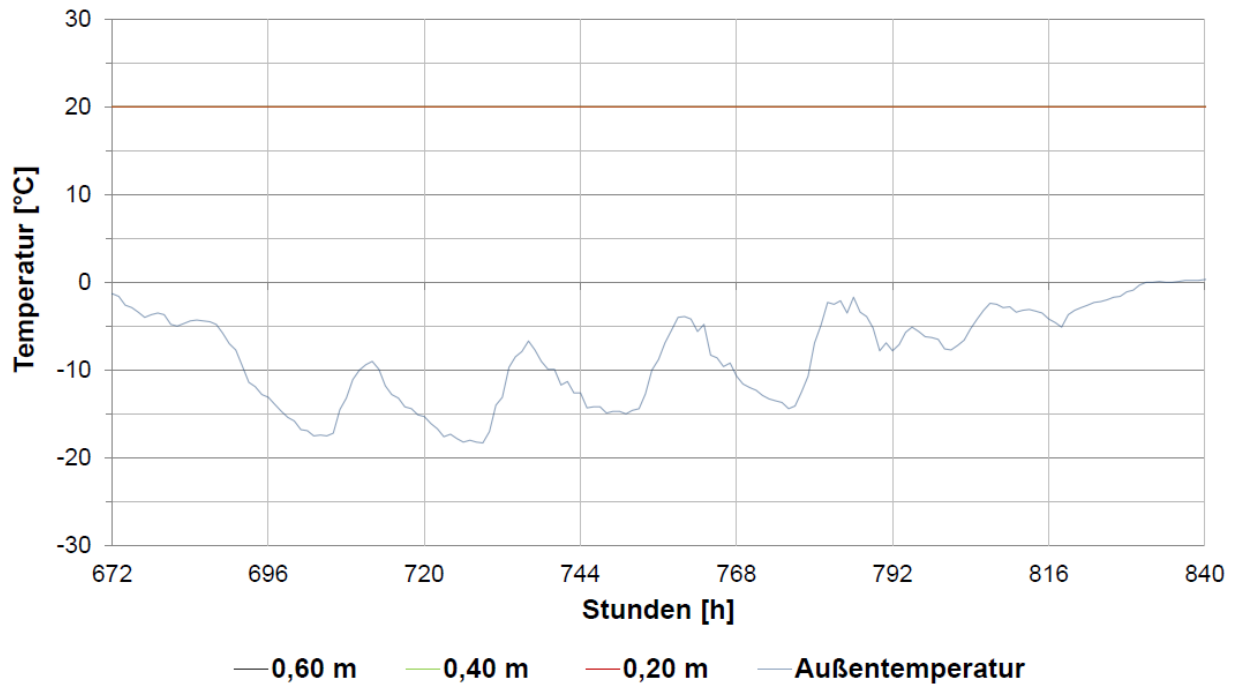


Abbildung A2.13: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

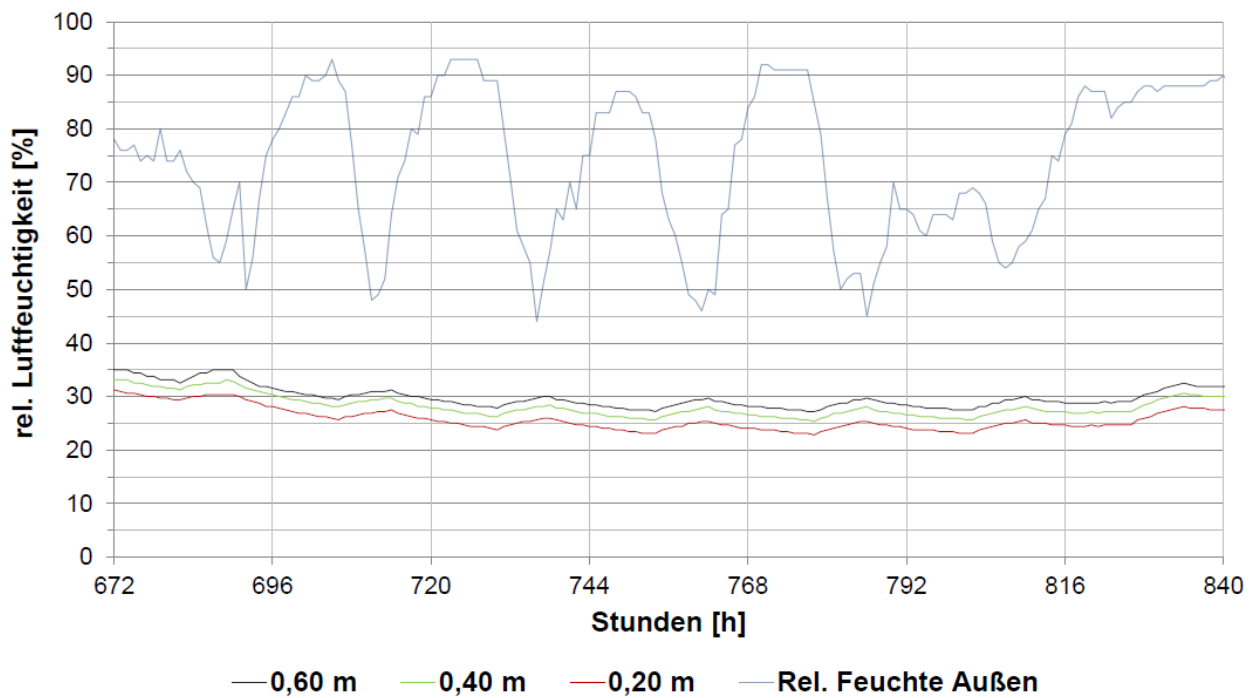


Abbildung A2.14: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

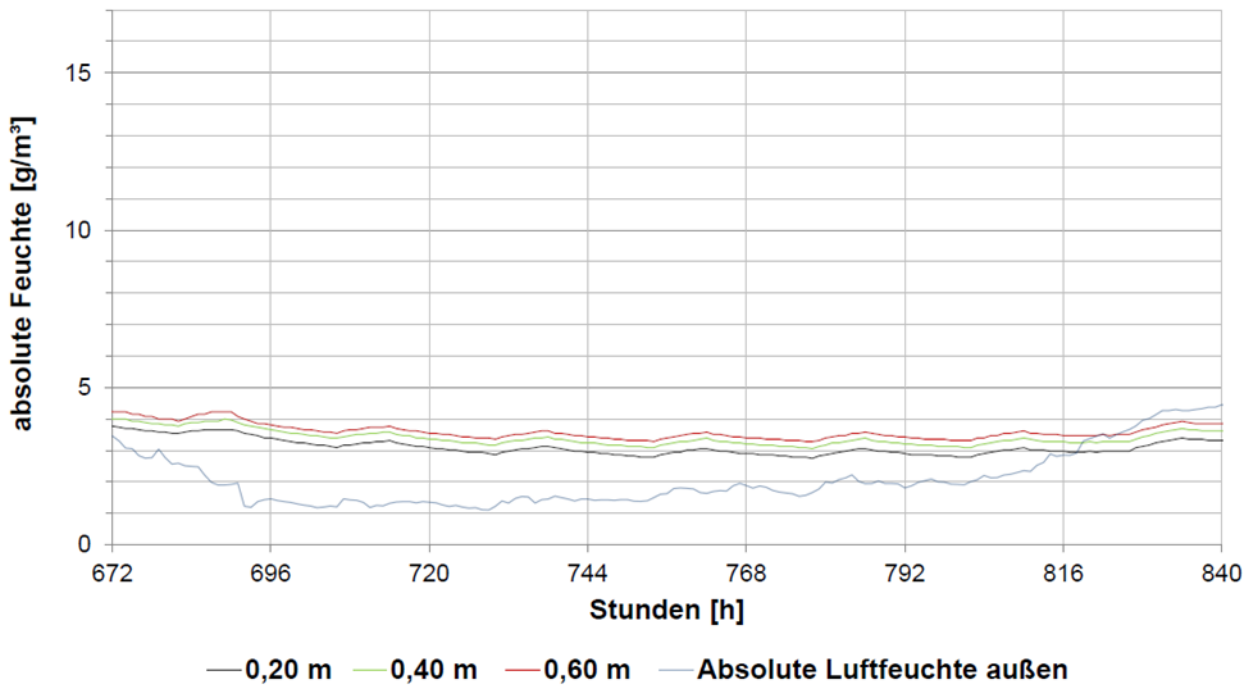


Abbildung A2.15: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden absoluten Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

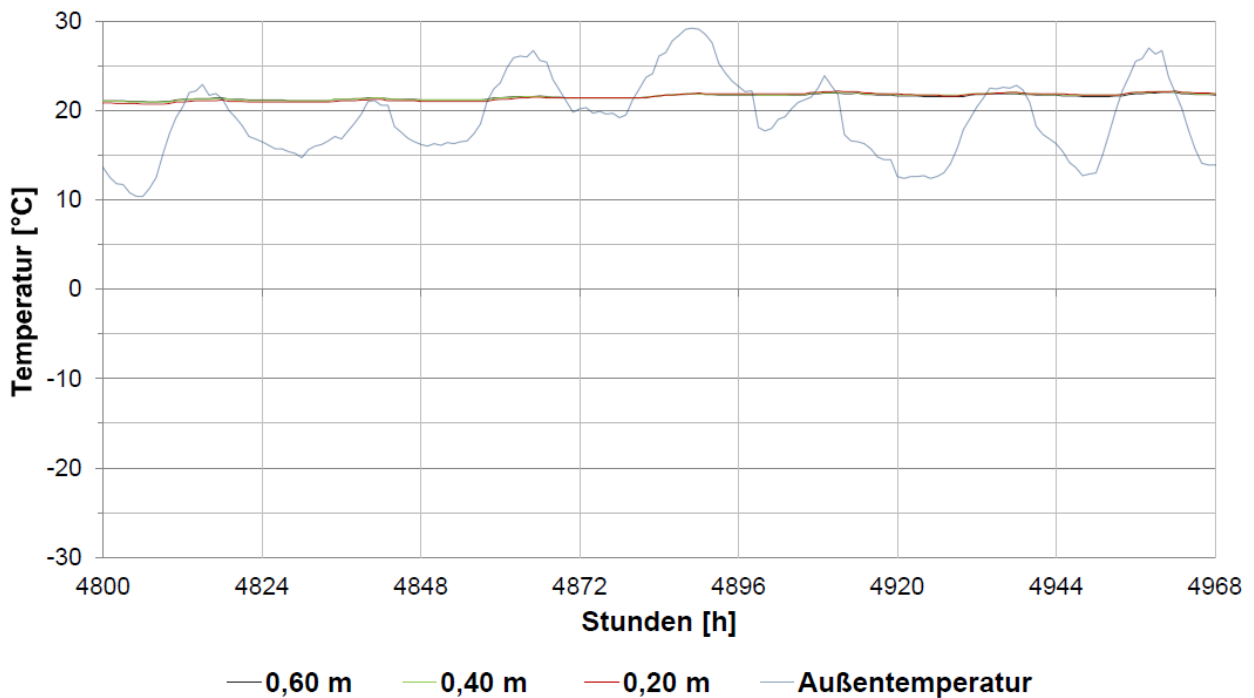


Abbildung A2.16: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

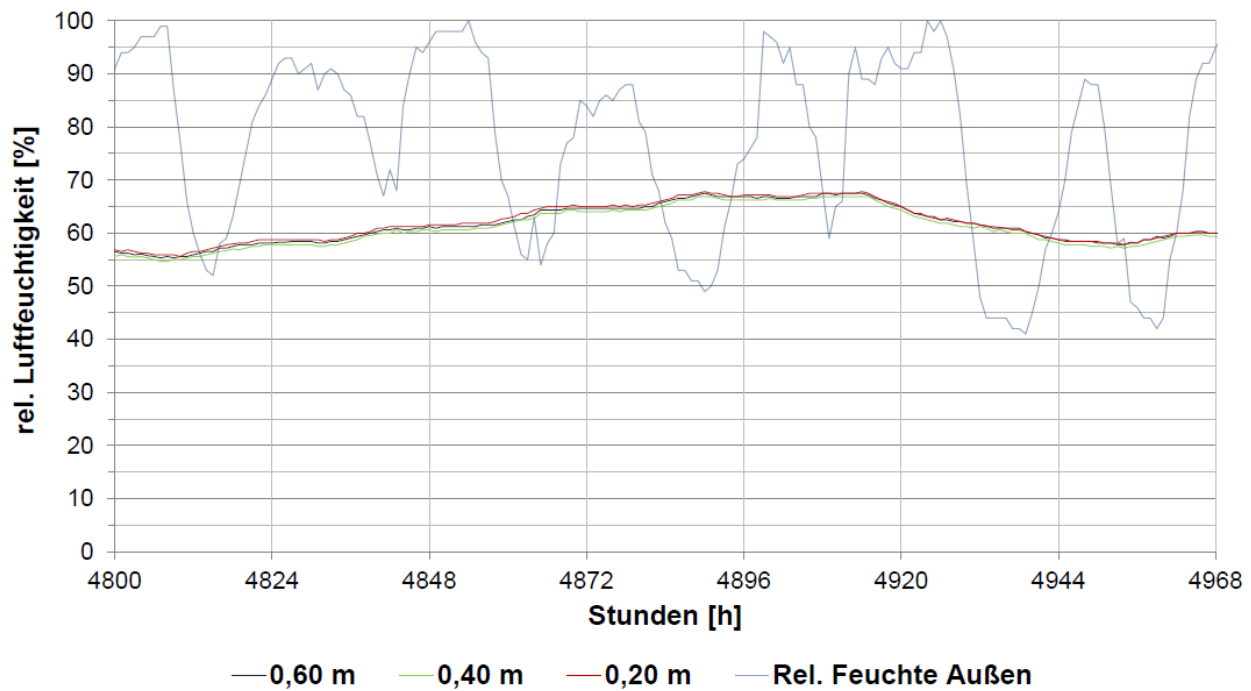


Abbildung A2.17: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

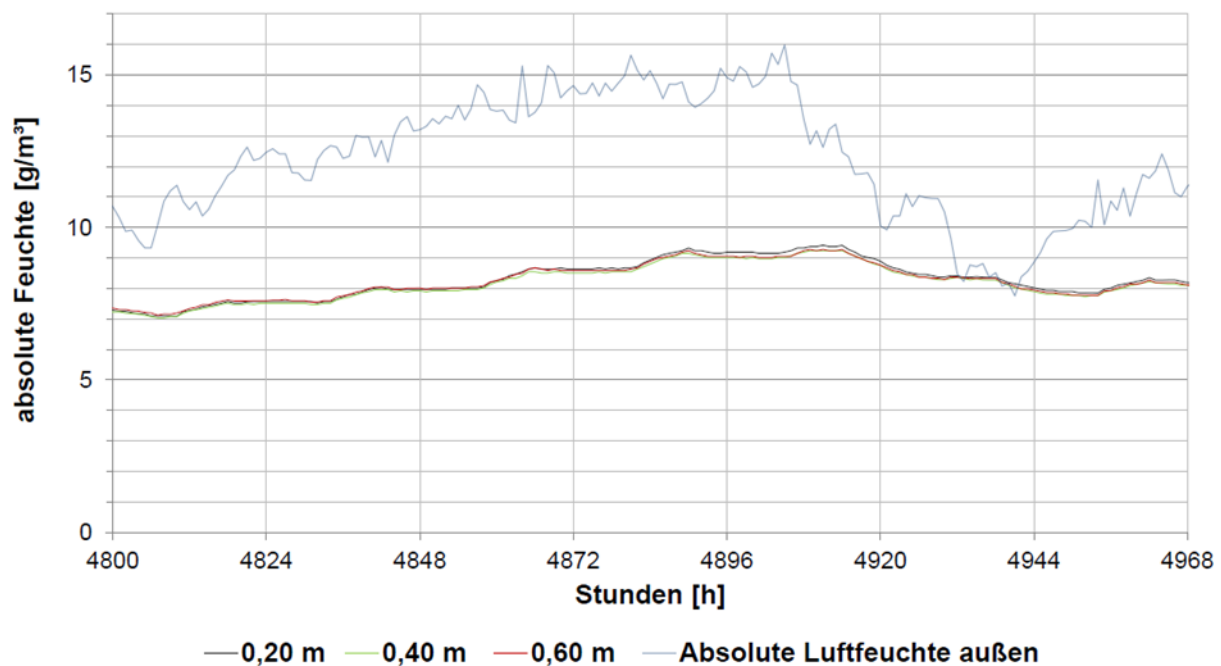


Abbildung A2.18: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden absoluten Luftfeuchte im Innenraum mit unterschiedlichen Stampflehmwandstärken

#### 1.4 Klimasimulation zur Baukonstruktion: Parameterstudie Trennwand zur Feuchtepufferung (Abschlussbericht 5.6.4.4)

Da Beton wie auch Stampflehm aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität schon hervorragende Materialien für den Museumsbau aus Sicht der Temperaturkonstanz darstellen, soll in einer weiteren Gegenüberstellung von Berechnungsvarianten das Augenmerk auf die Feuchtespeicherfähigkeit der Baustoffe gelenkt werden. Die im Folgenden dargestellte Parameterstudie untersucht

das Klima, das sich im Ausstellungsraum an einem stark frequentierten Jahr mit konstant 80 Besuchern (unter Berücksichtigung der entsprechenden personenbedingten Wärme- und Feuchtlasten und des notwendigen personenbedingten Außenluftvolumenstroms) während der Öffnungszeiten bei Annahme dreier unterschiedlicher massiver Trennwandaufbauten (an beiden Längsseiten) ergibt. Als Varianten wurden die folgenden Trennwände (und weitere Oberflächen) in der Simulation angesetzt:

- 30 cm Trennwände aus schwerem Wandbildner (z.B. Beton) ohne Feuchtepufferfähigkeit bspw. bei Metallverkleidung/diffusionsdichter Versiegelung, restliche Oberflächen ohne Feuchtepufferfähigkeit
- 30 cm Beton-Trennwände, alle restlichen Oberflächen Beton
- 60 cm Stampflehm-Trennwände, restliche Wandoberflächen mit Lehmputz, Tragwerk aus Holz)

Die beiden Jahresübersichten für Lufttemperatur und – feuchtigkeit auf den Abbildung A2.19 und Abbildung A2.20 zeigen deutlich, dass sich bei aller Temperaturkonstanz (resultierend aus den bei allen Varianten hohen Wärmespeicherfähigkeit der massiven Bauteile) die hygrischen Verhältnisse in der Ausstellung sehr stark in den berechneten Varianten unterscheiden.

Die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit in der Kältewoche zeigen gleich zu Wochenbeginn einen starken Abfall an, da der Raum infolge des geringen Infiltrationsluftwechsels mit sehr trockener Außenluft an Raumlufffeuchte einbüßt. Das Modell mit Lehmoberflächen und –bauteilen kann diesem Effekt die Feuchtespeicherfähigkeit des Materials entgegensetzen. Die Tagesschwankungen sind hier am geringsten und auch die Durchschnittswerte der Luftfeuchtigkeit über die Woche beweisen den moderatsten Abfall. Während der 10 stündigen Öffnungszeiten mit starkem Besucherverkehr steigen bei allen Varianten trotz des erhöhten personenbedingten Außenluftwechsels aufgrund der von den Menschen abgegebenen Feuchte die Werte für die Raumlufffeuchten wieder an. Die Zunahme über den Tag liegt bei der Variante ohne Feuchtepufferung bei bis zu 25%, bei Beton und Lehm sind es bis zu 10%. In der Hitzeperiode zeigt Lehm dem Beton gegenüber leichte Vorzüge in der Dämpfung der Feuchteschwankungen über den Tag, dies ist besonders gut im Zweitagesverlauf zu sehen (Abbildung A2.23). Der Anstieg über den Zeitraum der Museumsöffnung (10-18 Uhr) ist kleiner, das langfristige Verhalten ebenfalls günstiger, da das Luftfeuchteniveau in der Lehmvariante geringer ist.

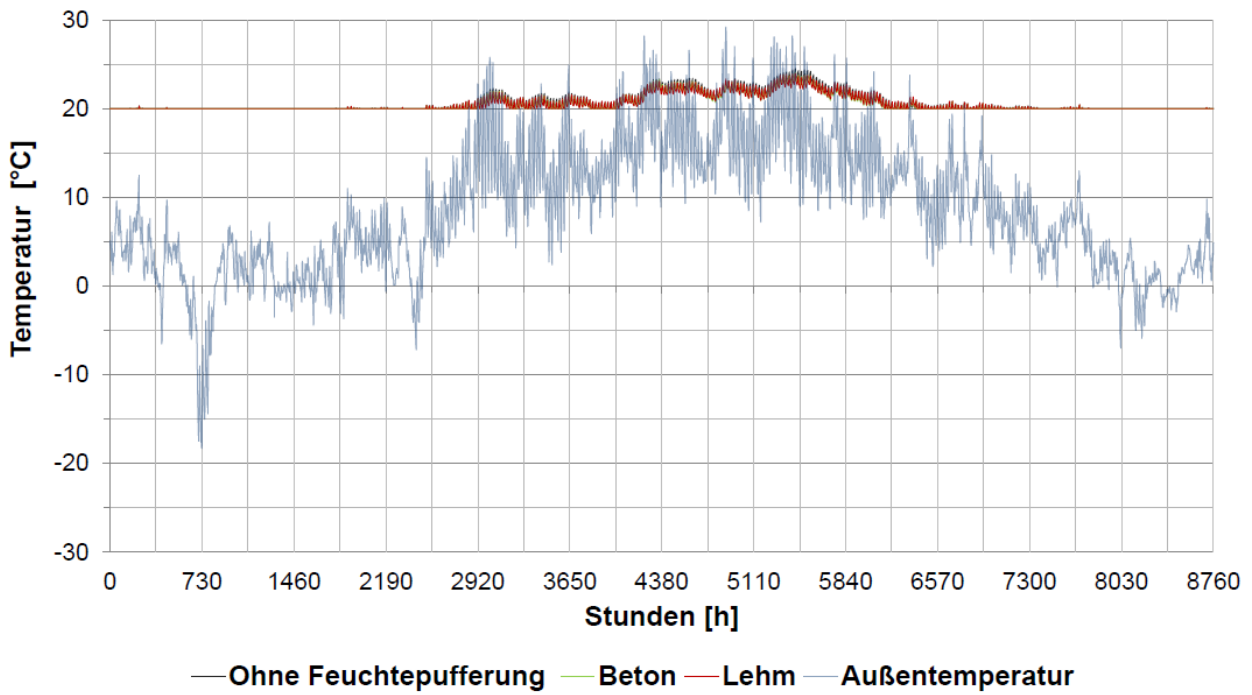


Abbildung A2.19: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen

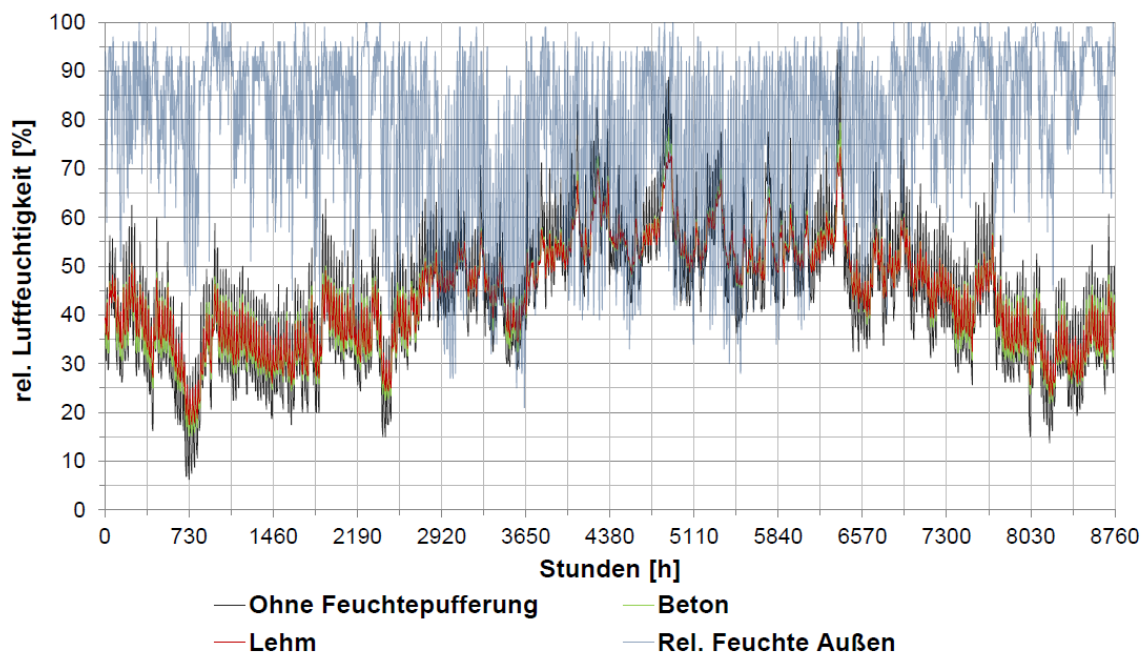


Abbildung A2.20: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen

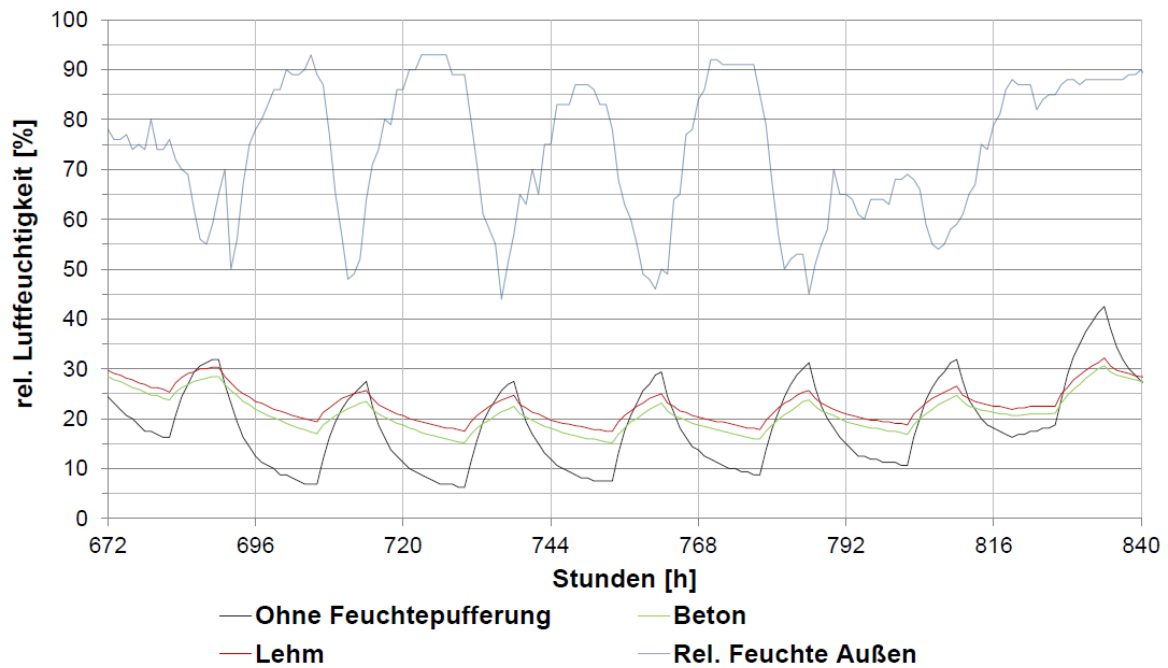


Abbildung A2.21: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen

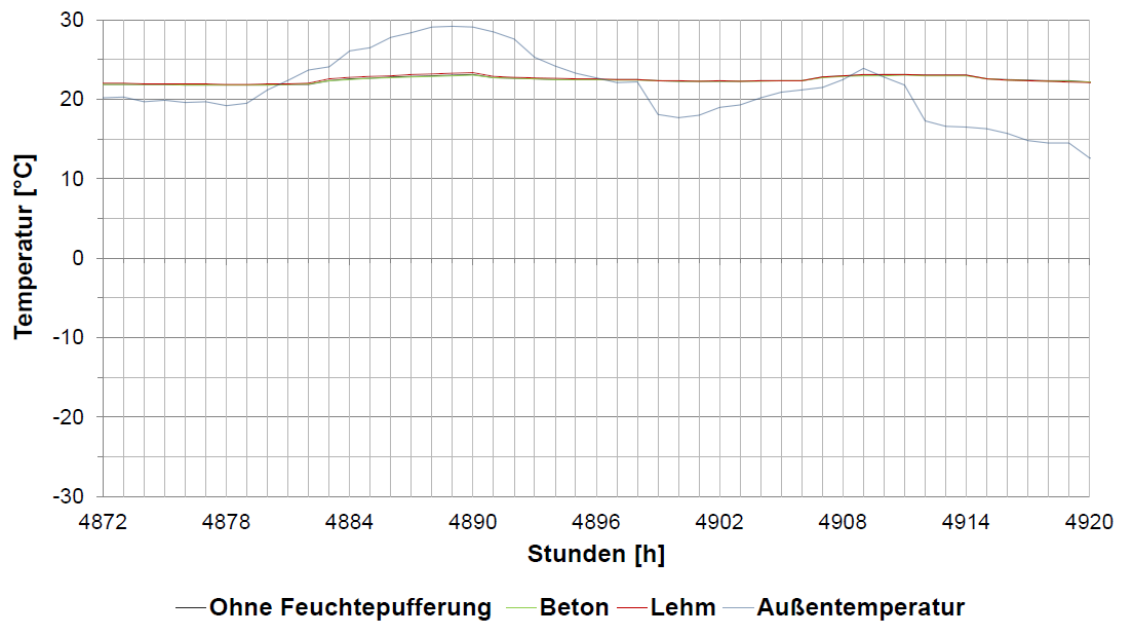


Abbildung A2.22: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.07. über die Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen



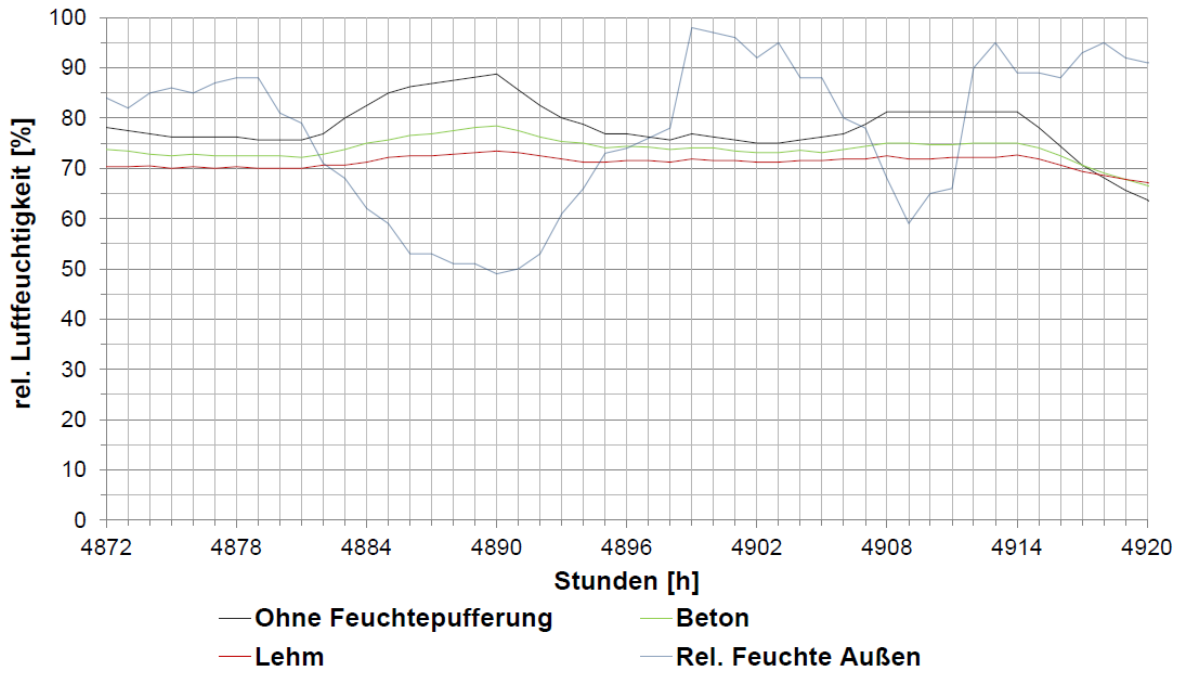


Abbildung A2.23: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.07. der resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen

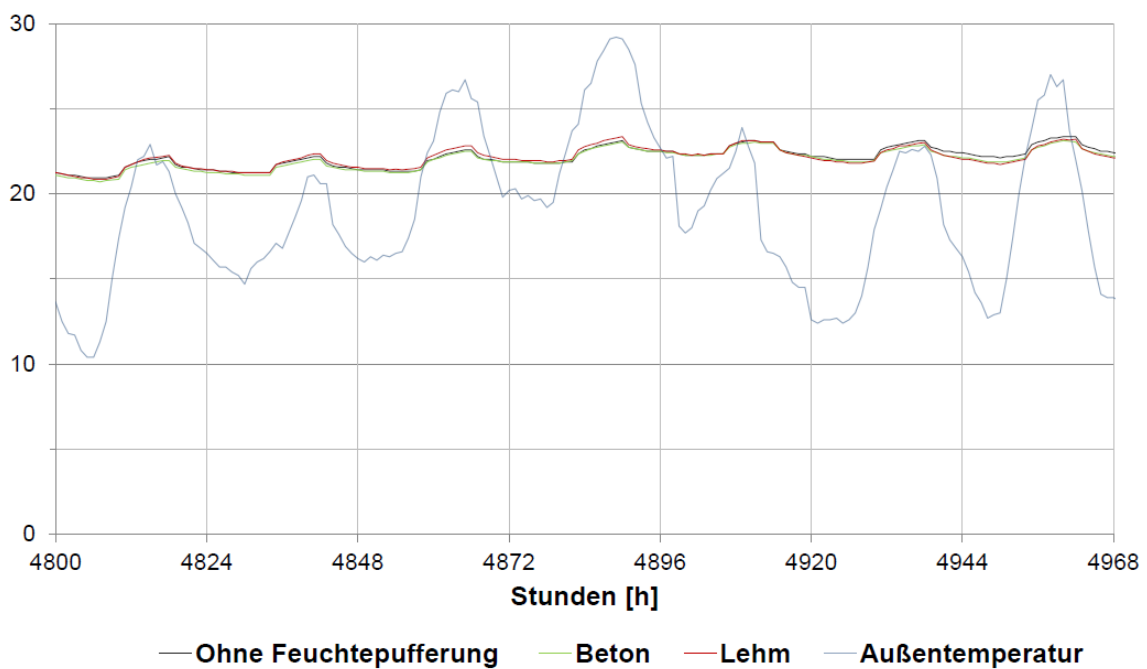


Abbildung A2.24: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen

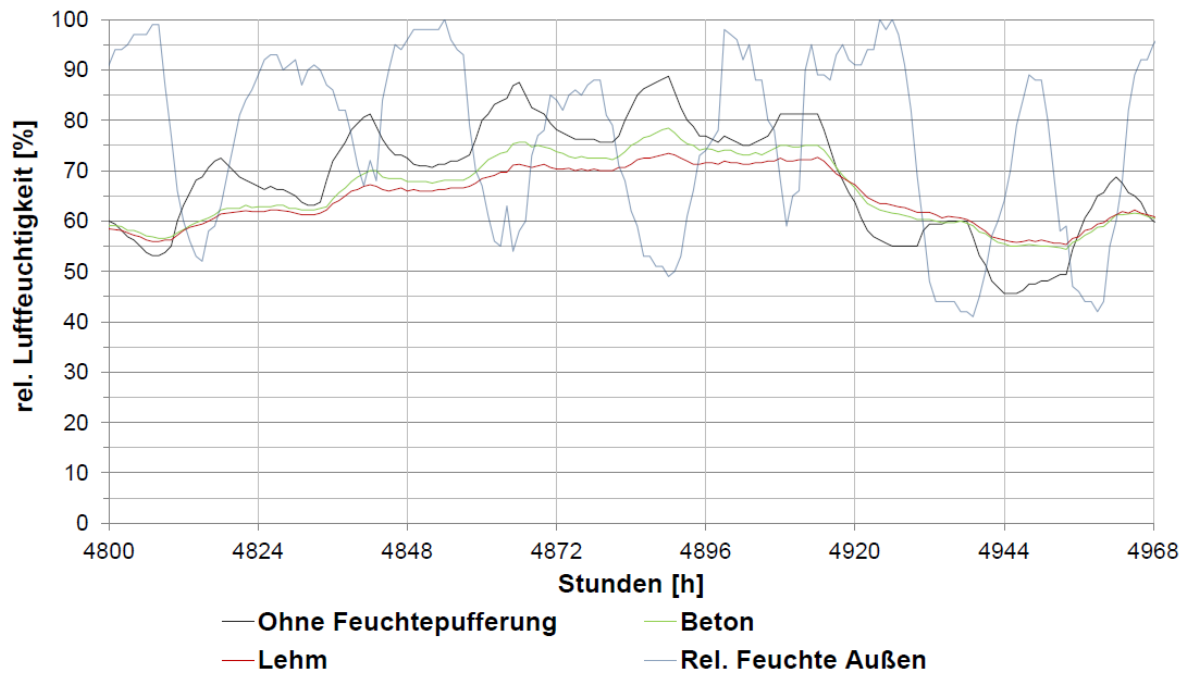


Abbildung A2.25: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlich feuchtepuffernden Oberflächen

Diese Betrachtungen zum Einfluss der raumoberflächenbildenden Materialien auf die Temperatur- besonders aber auf die Luftfeuchteverhältnisse wurden darüber hinaus mittels eines Szenarios untersucht, nach dem stoßweise für nur eine Stunde am Tag 200 Menschen die Ausstellung besuchen. Der Luftwechsel wird in dieser worst case-Studie gleichbleibend mit nur 400 m<sup>3</sup>/h angesetzt, also nicht ad hoc aufgrund der hohen Besucherzahl vervielfacht, damit die Auswirkungen der personenbedingten Wärme- und Feuchtelasten im modellierten Raum bei unterschiedlichen Materialien (30 cm Sichtbeton, 60 cm Stampflehm, 2 cm Gipsputz auf 30 cm Beton, 2 cm Lehmputz auf 30 cm Beton oder 30 cm Vollholz) deutlich werden.

Keiner der in dieser Parameterstudie für die komplette Innenoberfläche angenommenen Baustoffe vermag es, Schwankungen der Luftfeuchte oder Temperatur im Ausstellungsraum angesichts der sehr hohen Besucherdichte ganz zu verhindern. Im Winter bewirken die Besucher innerhalb der einstündigen Besucherspitze unabhängig vom Baustoffeinsatz eine Anhebung der Raumlufttemperatur um ca. 1K. Die relative Luftfeuchte steigt in dieser Zeit um rund 12 Prozentpunkte bei Beton mit oder ohne Gipsputz, um 10 bis 11 Prozentpunkte bei Lehmputz auf Beton und bei Vollholz (wobei diese bei Vollholz etwas schneller wieder abfällt) und um rund 8 bis 9 Prozentpunkte bei Stampflehm. Insgesamt ist auch wie vorher bereits festgestellt das winterliche Luftfeuchteniveau hier nicht so niedrig wie bei den anderen, weniger feuchtepuffernden Materialien.

Ein ganz ähnliches Bild ergibt sich in der Sommerwoche mit leichten Temperaturspitzen von 1 bis 2K Temperaturanstieg innen während der Stoßzeit und gleichzeitigem Anstieg der relativen Luftfeuchte, der in der Stampflehm-Variante geringer ausfällt als bei Holz und Lehmputz bzw. insbesondere bei reinen Sichtbeton oder Gipsputzoberflächen. Wiederum zeigen sich bei Stampflehm kurz- und langfristig die kleinsten Schwankungen der Luftfeuchte gepaart mit guter Temperaturstabilität, die vergleichbar ist mit der von Beton.

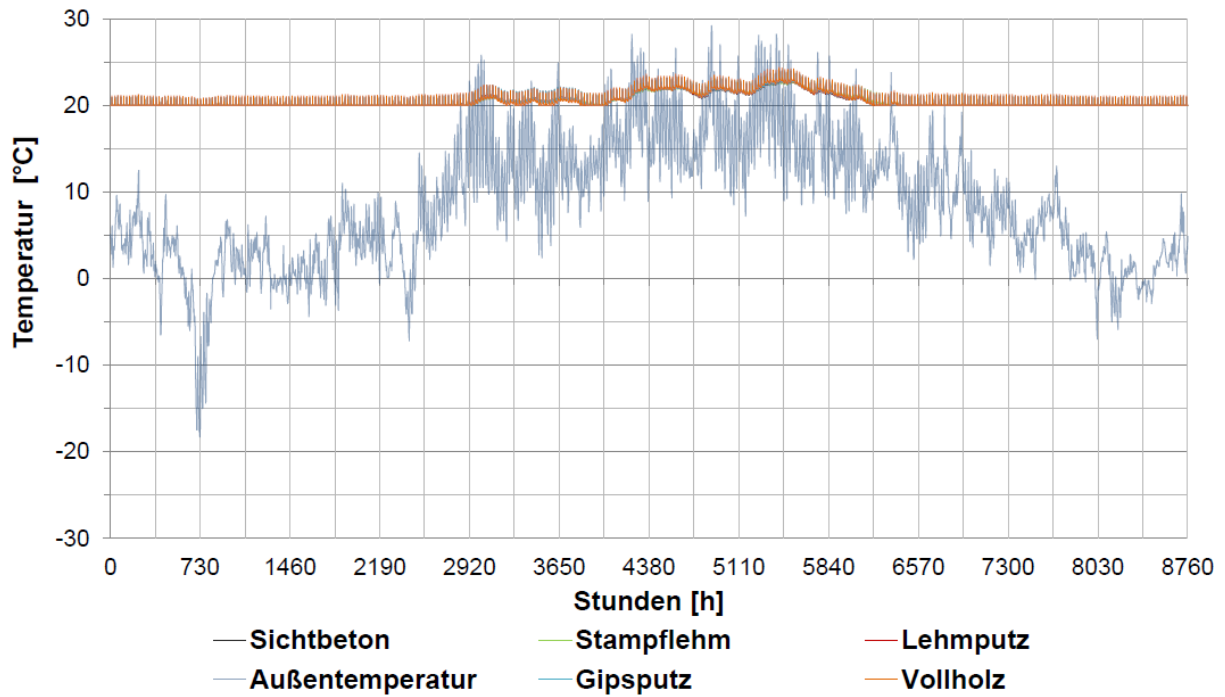


Abbildung A2.26: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien

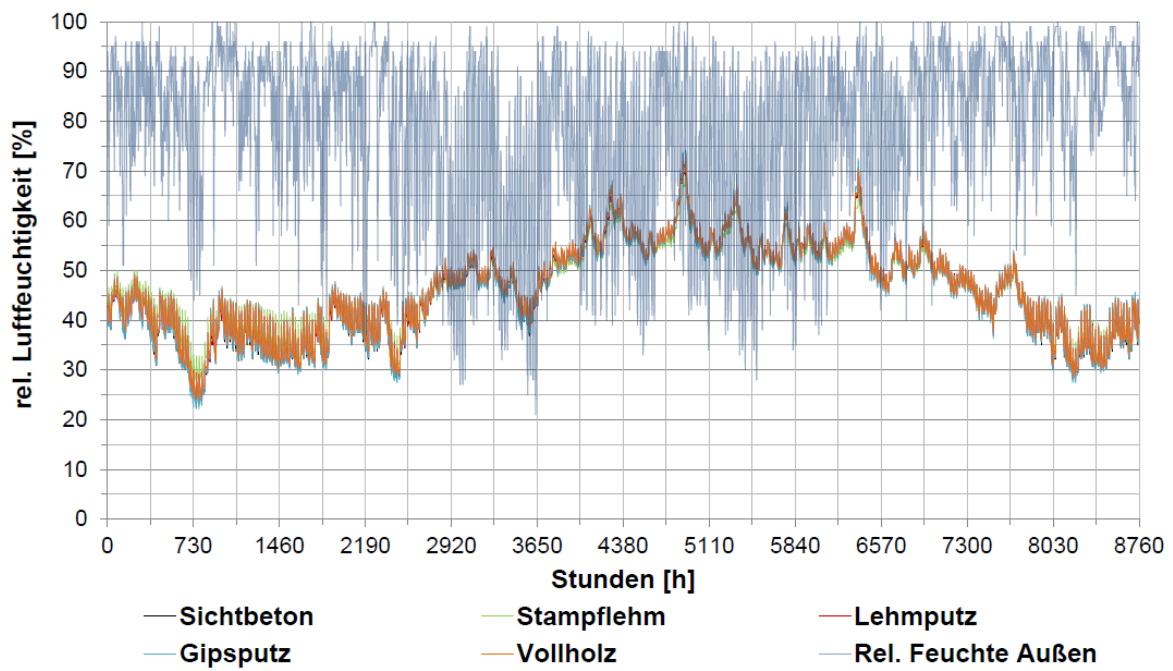


Abbildung A2.27: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien

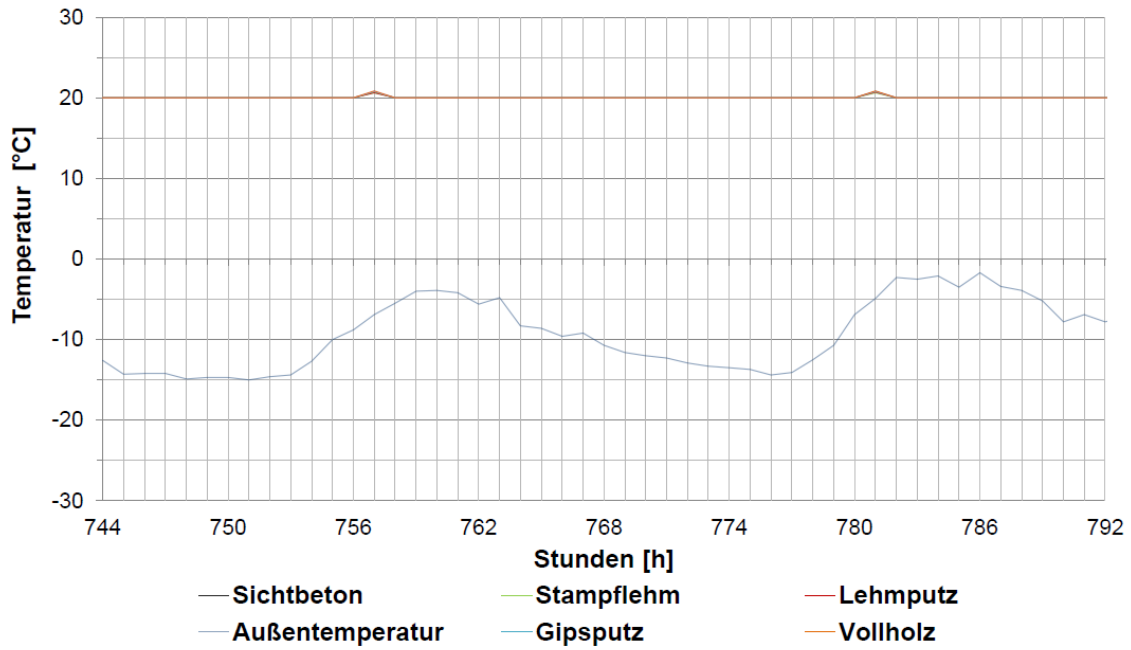


Abbildung A2.28: Zwei Tagesübersicht vom 01.02. bis zum 02.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien

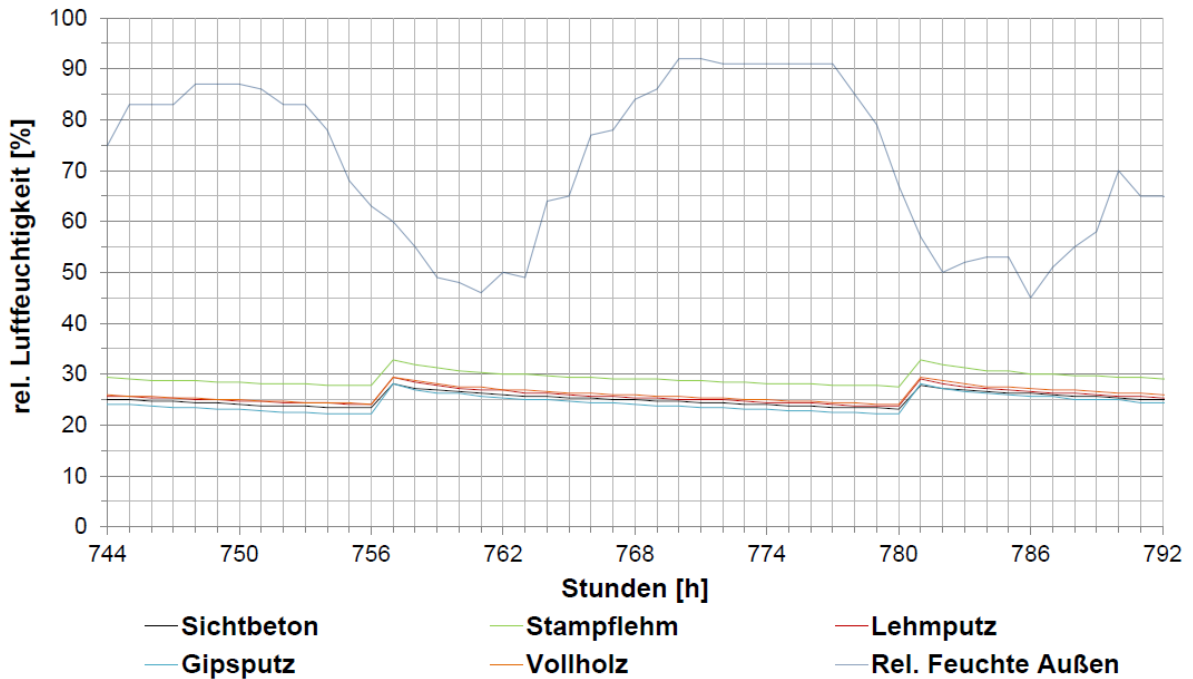


Abbildung A2.29: Zwei Tagesübersicht vom 01.02. bis zum 02.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien

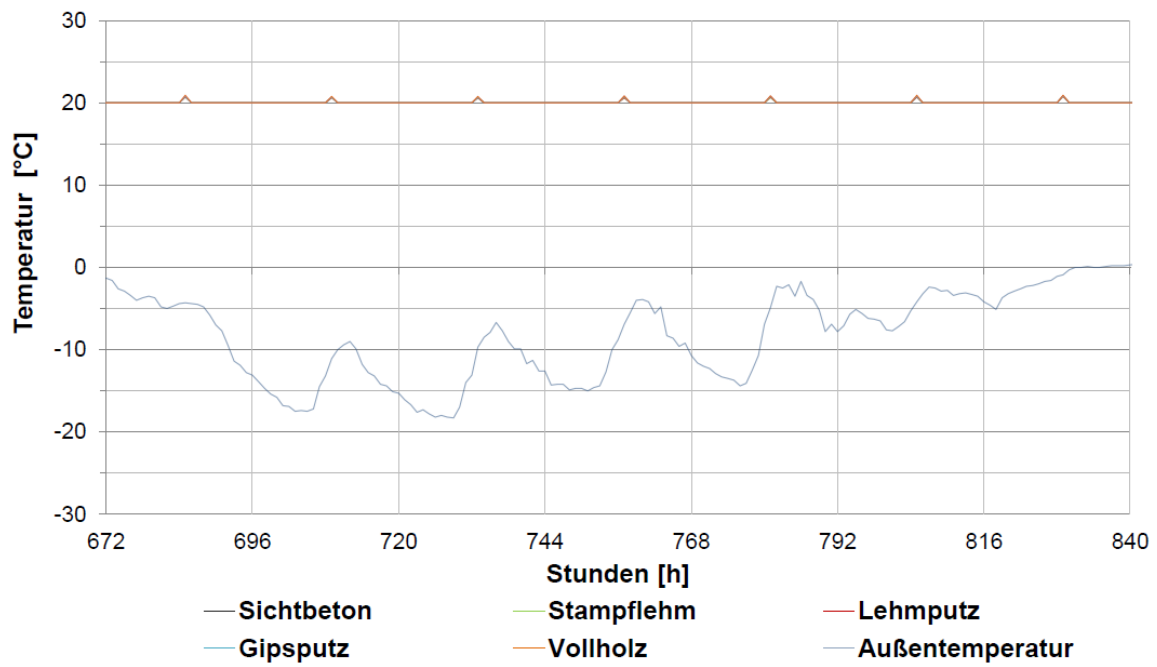


Abbildung A2.30: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien

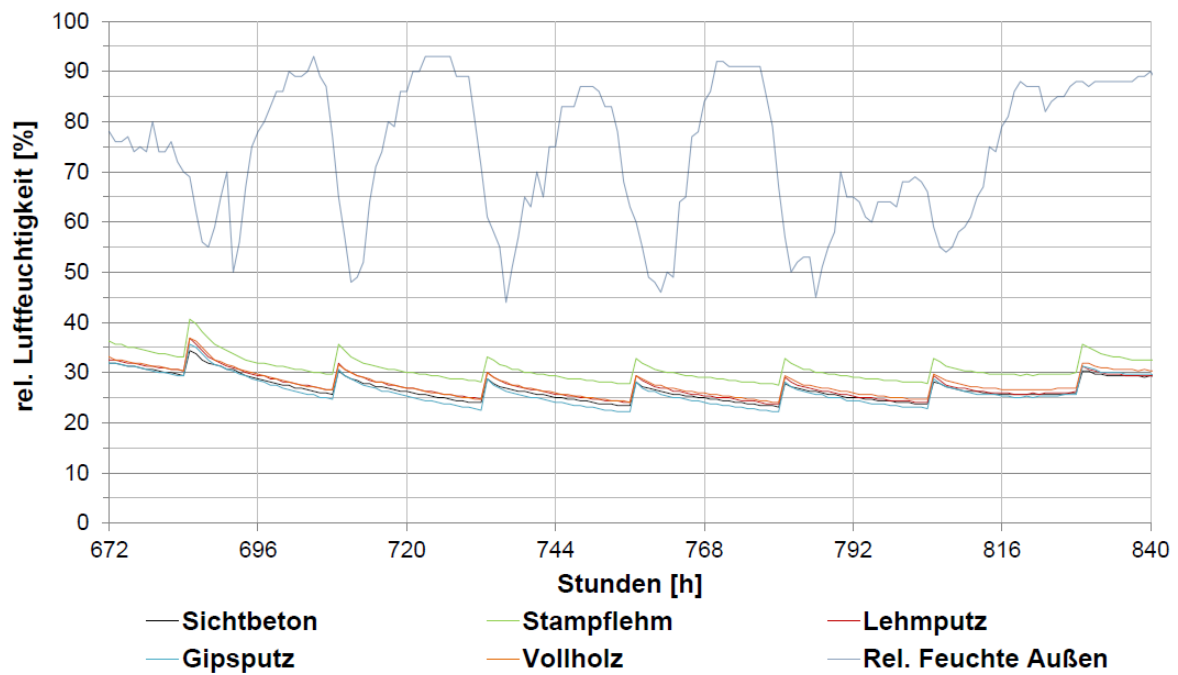


Abbildung A2.31: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien

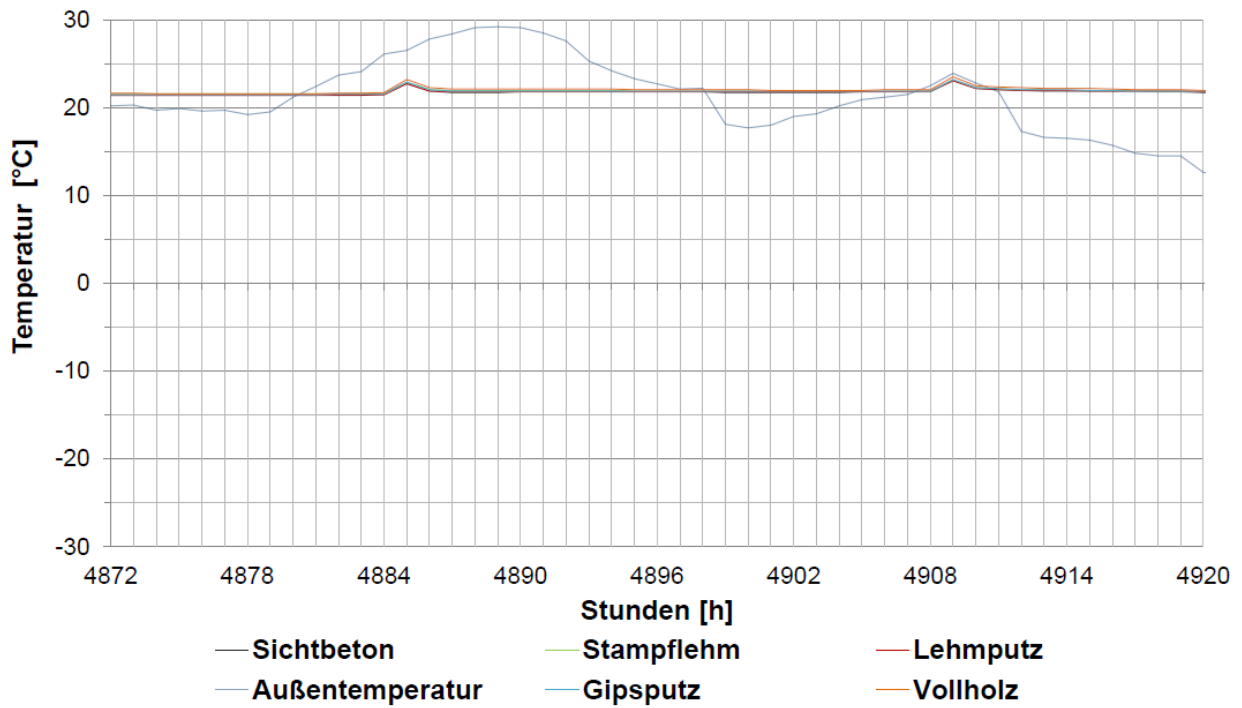


Abbildung A2.32: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.0. über die Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien

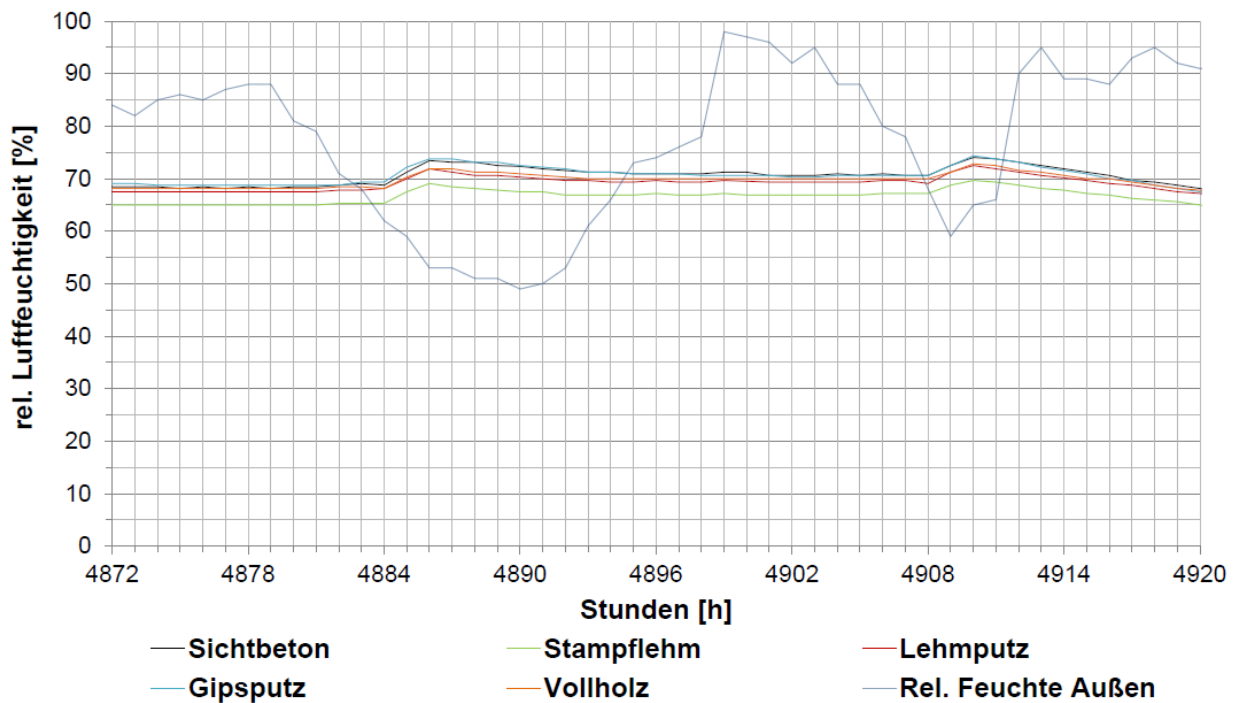


Abbildung A2.33: Zwei Tagesübersicht vom 22.07. bis zum 23.07. der resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit im Innenraum unterschiedlicher Materialien

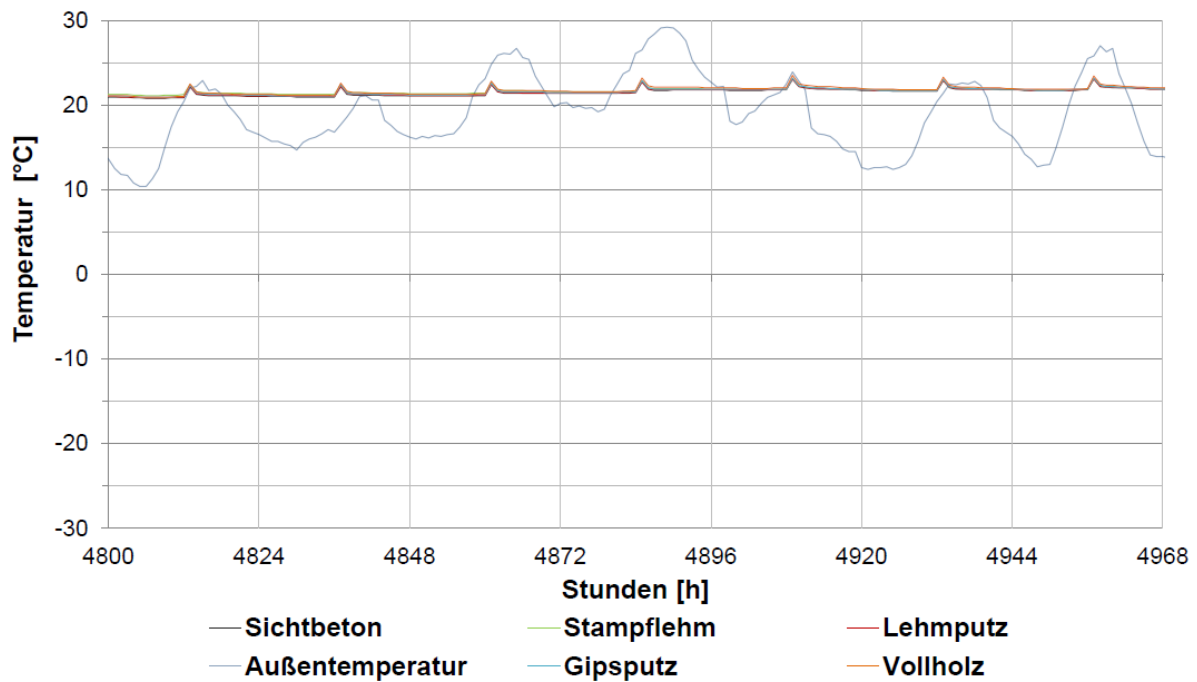


Abbildung A2.34: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedlicher Materialien

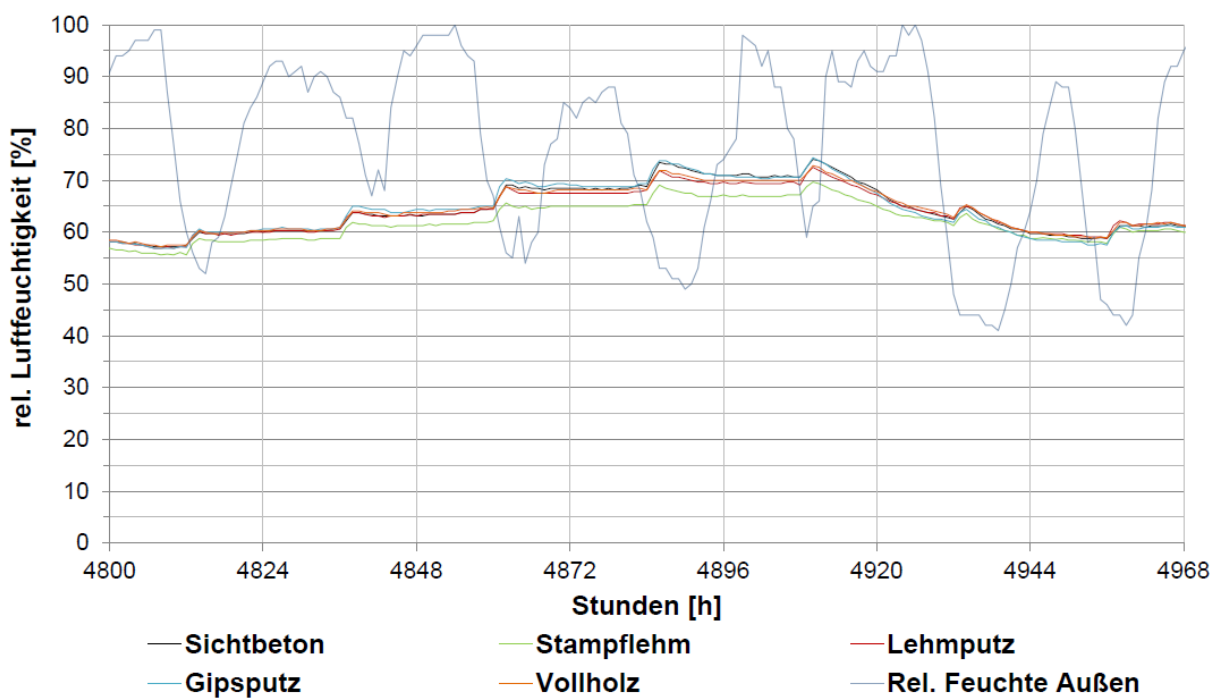


Abbildung A2.35: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedlicher Materialien

### 1.5 Klimasimulation zur Raumnutzung: Parameterstudie Besucherzahlen (Abschlussbericht 6.1.1.1)

Eine – wenn auch zweifelsohne gewünschte – Störgröße im Museum unter klimatischen Gesichtspunkten betrachtet ist jeder Besucher, weil er trockene und feuchte Wärme mit in die Räumlichkeiten trägt. Auch wenn Kleidung und Schuhe als trocken und „neutral“ vorausgesetzt werden, setzen Men-

schen bei mäßiger Aktivität im Stehen oder beim langsamen Gehen nach DIN 2078 170W an Wärmeleistung (40% Strahlung, 60% Konvektion) und 98g Feuchtigkeit pro Stunde durch Transpiration und Aspiration frei. Zudem benötigen die Besucher sauerstoffreiche Außenluft, so dass mit steigenden Besucherzahlen samt der eingetragenen menschlichen Wärme- und Feuchtelasten noch zusätzliche klimatische Beeinflussungen durch einen erhöhten Außenluftwechsel zu verzeichnen sind. Ist die Außenluft unkonditioniert, bedeutet dies je nach Jahreszeit die Zufuhr kalter, trockener Luft oder auch warmer, feuchter in Höhe von 400, 1600 oder 4000 m<sup>3</sup>/h entsprechend einem Außenluftwechsel von 0,06/h, 0,23/h oder 0,57/h bei 20, 80 oder sogar 200 Personen um Ausstellungsraum.

Innerhalb der nun dargestellten Parameterstudie sollen die Auswirkungen von dieser drei Besucherzahlen innerhalb der Öffnungszeiten von 10-18 Uhr auf das Museumsklima untersucht werden. Der Ausstellungsraum besitzt die vorab betrachteten Stampflehmwände (60cm) sowie zudem Betonbauteile; im Winter ist wie vorher eine Beheizung auf 20°C angesetzt.

Schon die Jahresverläufe in der Abbildung A2.36 und Abbildung A2.37 zeigen unverkennbar die starken Temperatur- und Feuchteschwankungen infolge hoher Besucherzahlen. Bei 200 Menschen schwankt die Feuchte innerhalb von 24 Stunden um bis zu 18%-Punkte, die Lufttemperatur um 4K. Dabei ist diese Besucherzahl als Ausnahmesituation anzusehen.

Bei konstant 20 Besuchern während des Tages sinken die winterlichen Innenluftfeuchten um bis zu 3 Prozentpunkte ab, bei 80 um 8 bis 10. Im Sommer sorgen die inneren Lasten aufgrund von 20, 80 oder 200 Besuchern und die erhöhte unkonditionierte Lüftung zu einem Anstieg der Innenlufttemperatur von unter einem, 1 bis 2 bzw. 4K sowie der relativen Luftfeuchte von rund 3, 5 bzw. 8 Prozentpunkten. Diese Werte sind naturgemäß stark von den spezifischen Außenklimabedingungen an dem betreffenden Tag abhängig, darum sollen diese Schwankungsbreiten als ungefähre Vergleichswerte dienen.

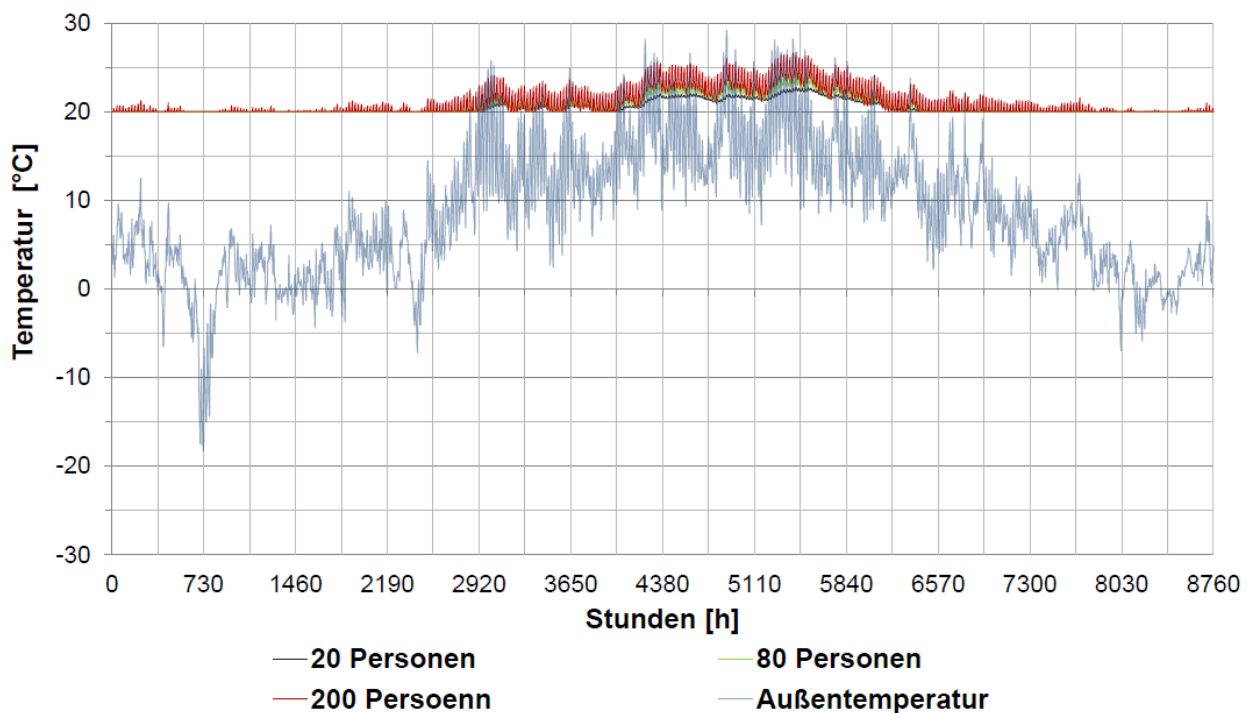


Abbildung A2.36: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen



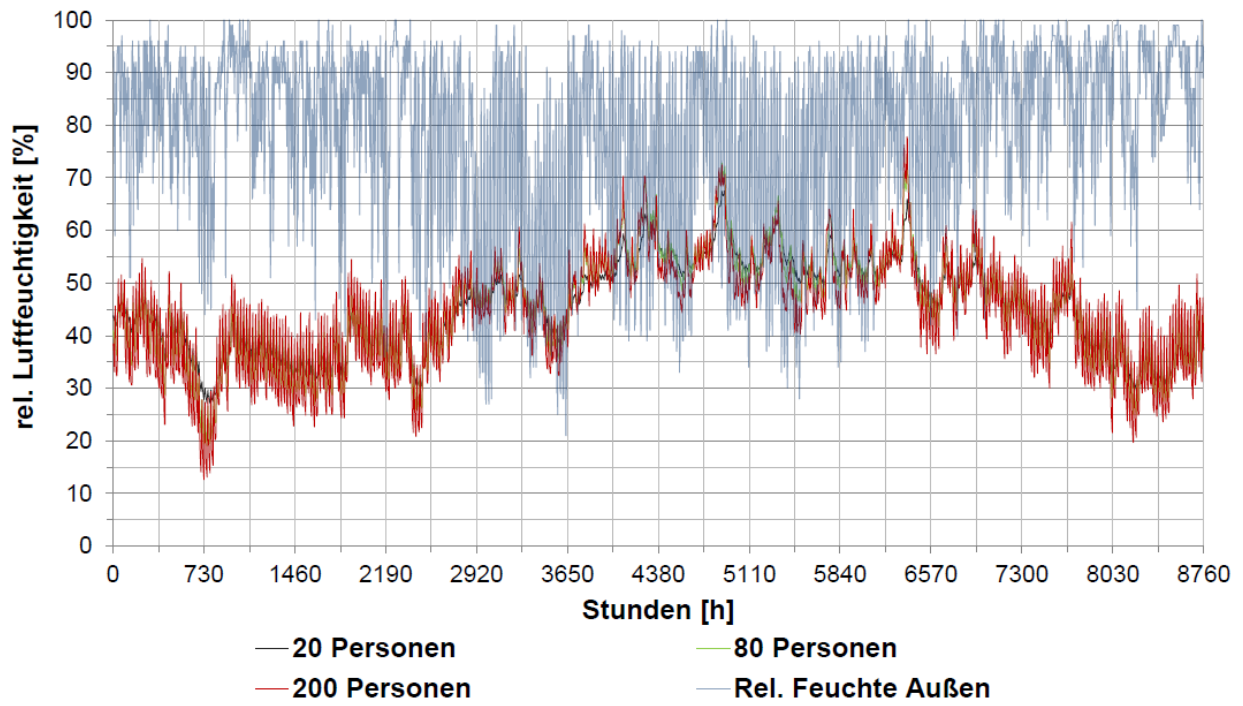


Abbildung A2.37: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen

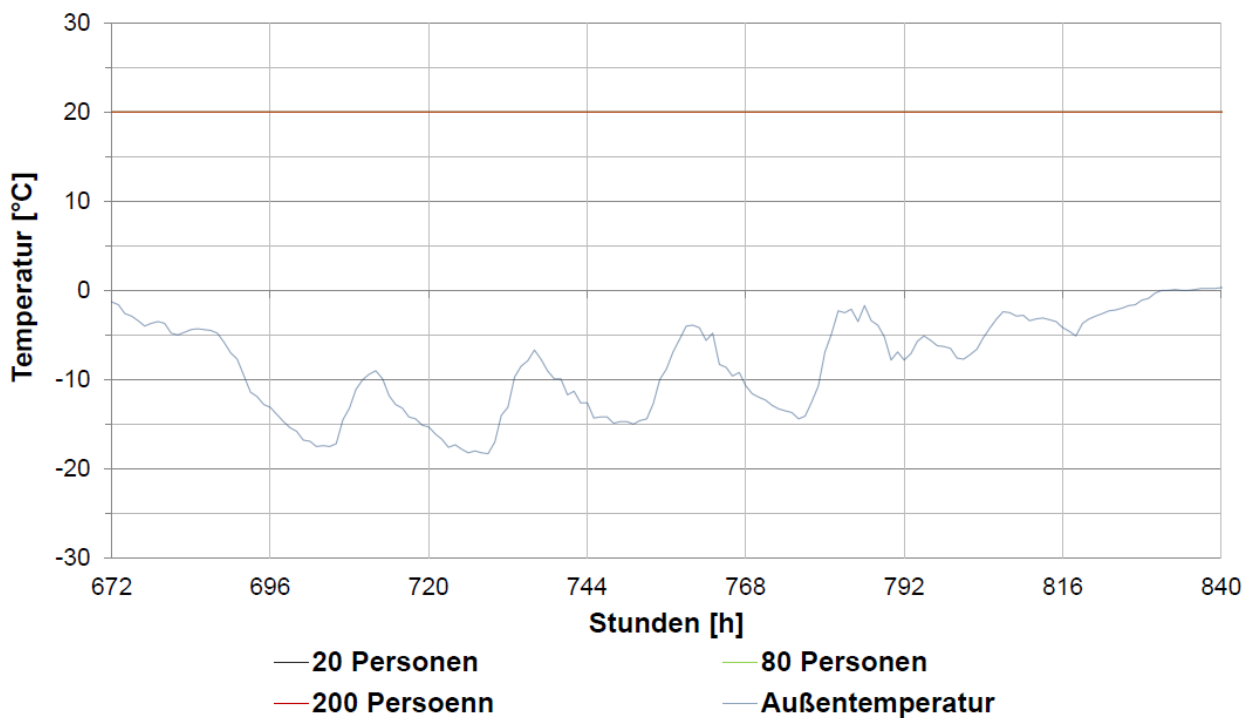


Abbildung A2.38: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen

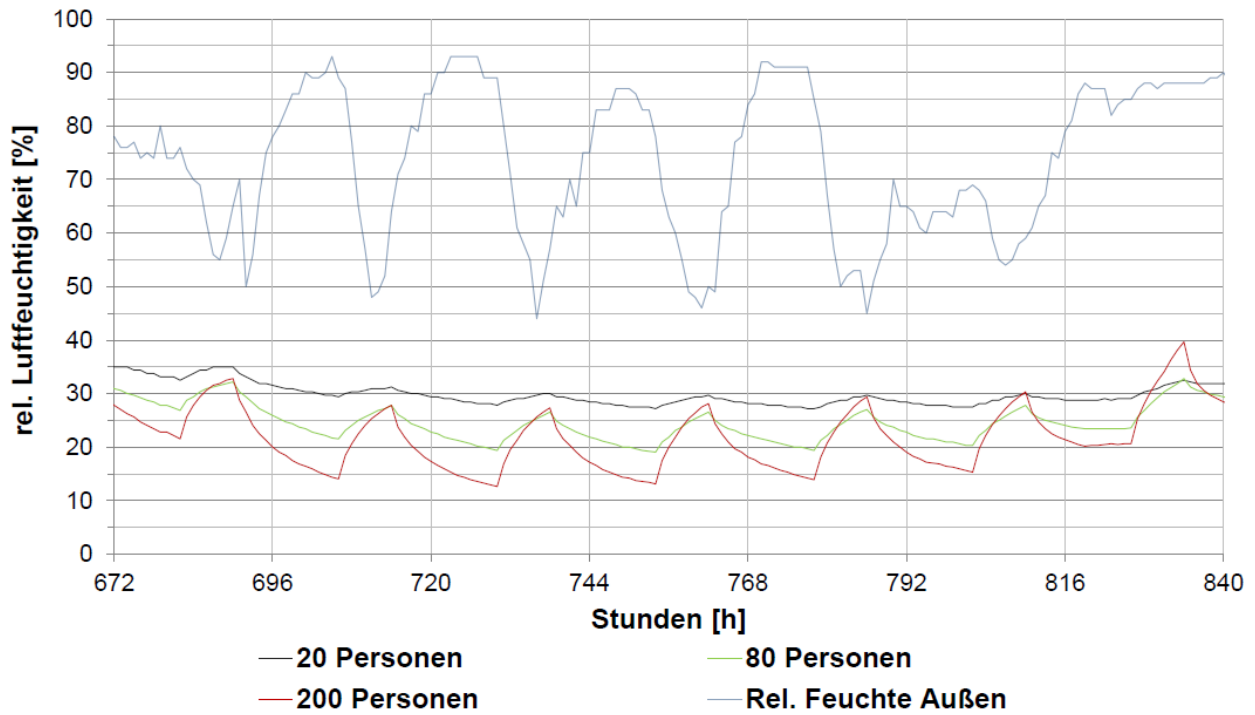


Abbildung A2.39: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen

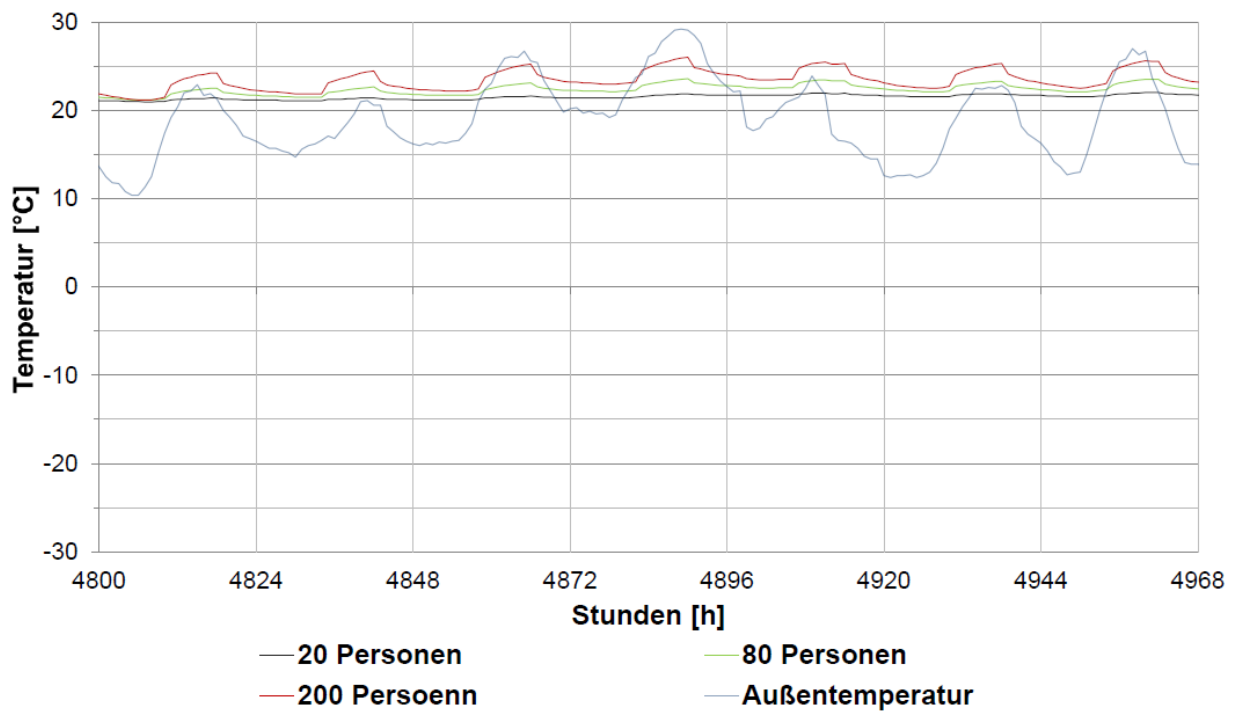


Abbildung A2.40: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen

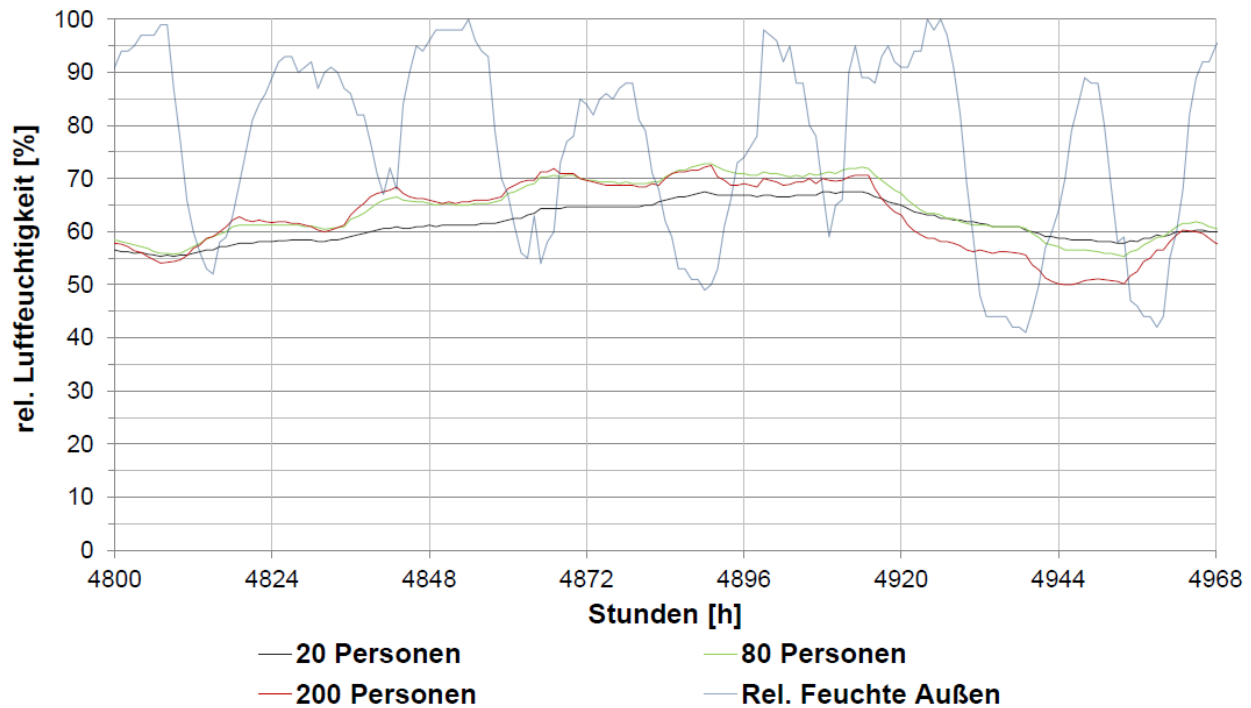


Abbildung A2.41: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum bei unterschiedlichen Besucherzahlen

## 1.6 Klimasimulation zur Raumnutzung: Parameterstudie Luftwechsel (Abschlussbericht 6.1.1.2)

Zur näheren Untersuchung der Frage, ob die Klimaschwankungen in Kapitel 1.5 unmittelbar durch die Interne Lasten der Besucher oder aufgrund des hieraus notwendigen werdenden höheren Außenluftwechsels resultieren, werden im Folgenden die Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Außenluftwechselzahlen dargestellt. Der Ausstellungsraum besteht wie üblich aus Betonbauteilen mit Stampflehtrennwänden und wird im Winter auf 20°C beheizt, eine sonstige Konditionierung findet nicht statt. Die Außenluftvolumenströme variieren zwischen 400 m<sup>3</sup>/h (= 0,057/h), 700 m<sup>3</sup>/h (=0,1 h<sup>-1</sup>) und 3500m<sup>3</sup>/h (= 0,5 h<sup>-1</sup>). Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass auch wenn sich die Lufttemperaturen im Innern kaum, d.h. maximal 1 bis 1,5K im Sommer erhöhen, ein hoher Außenluftvolumenstrom erwartungsgemäß entsprechend Einfluss auf die Feuchteverhältnisse im Raum nimmt: Im Sommer liegt die relative Luftfeuchte bei 0,5-fachen Luftwechsel mitunter 10 Prozentpunkte höher als bei 0,057-fachen Luftwechsel, im Winter 18 Prozentpunkte niedriger.

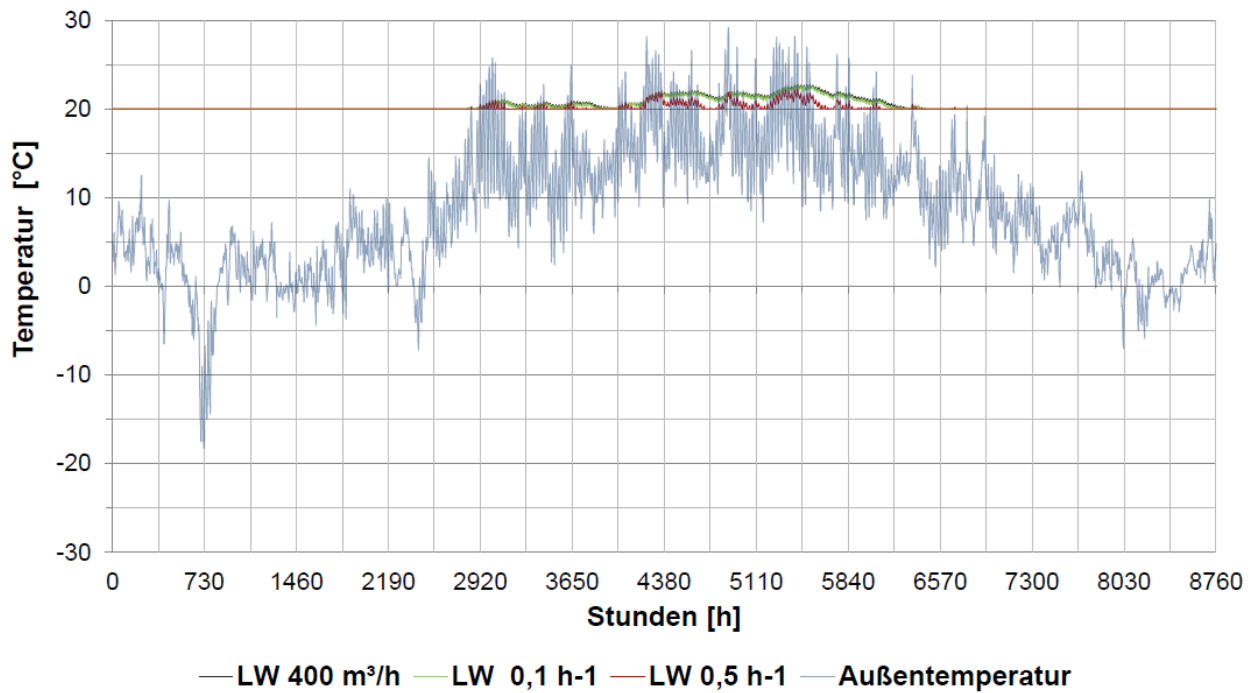


Abbildung A2.42: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Innenraum für unterschiedliche Luftwechselraten

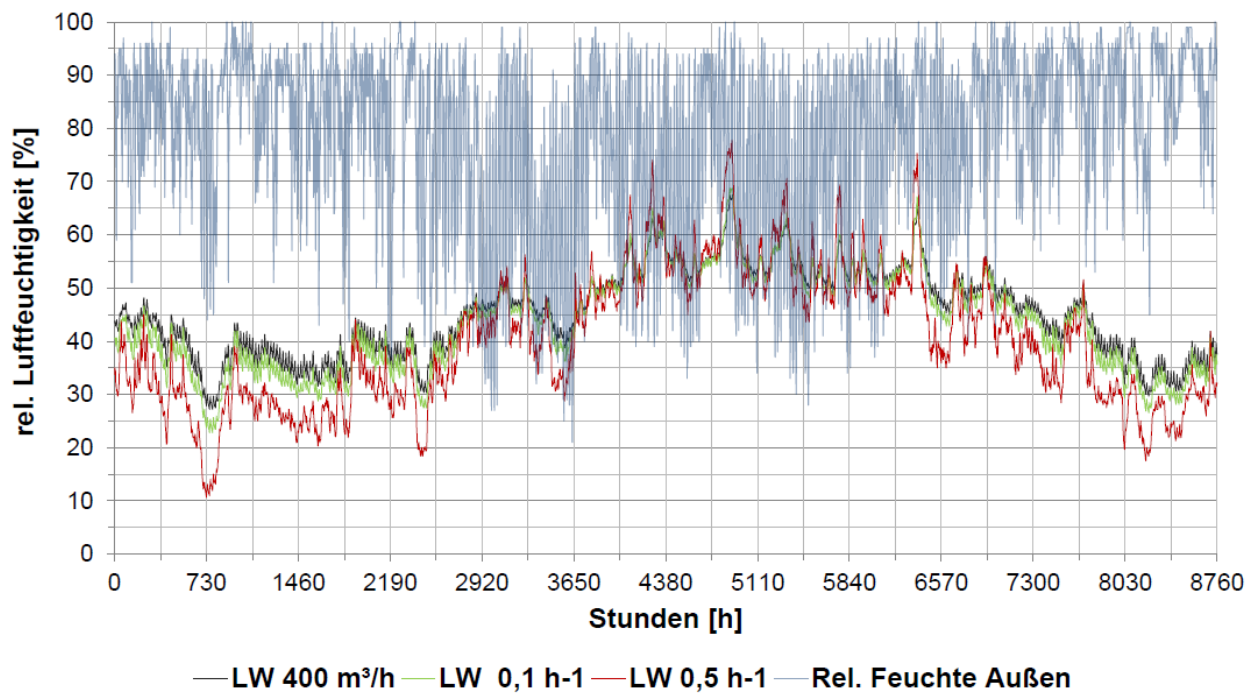


Abbildung A2.43: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten

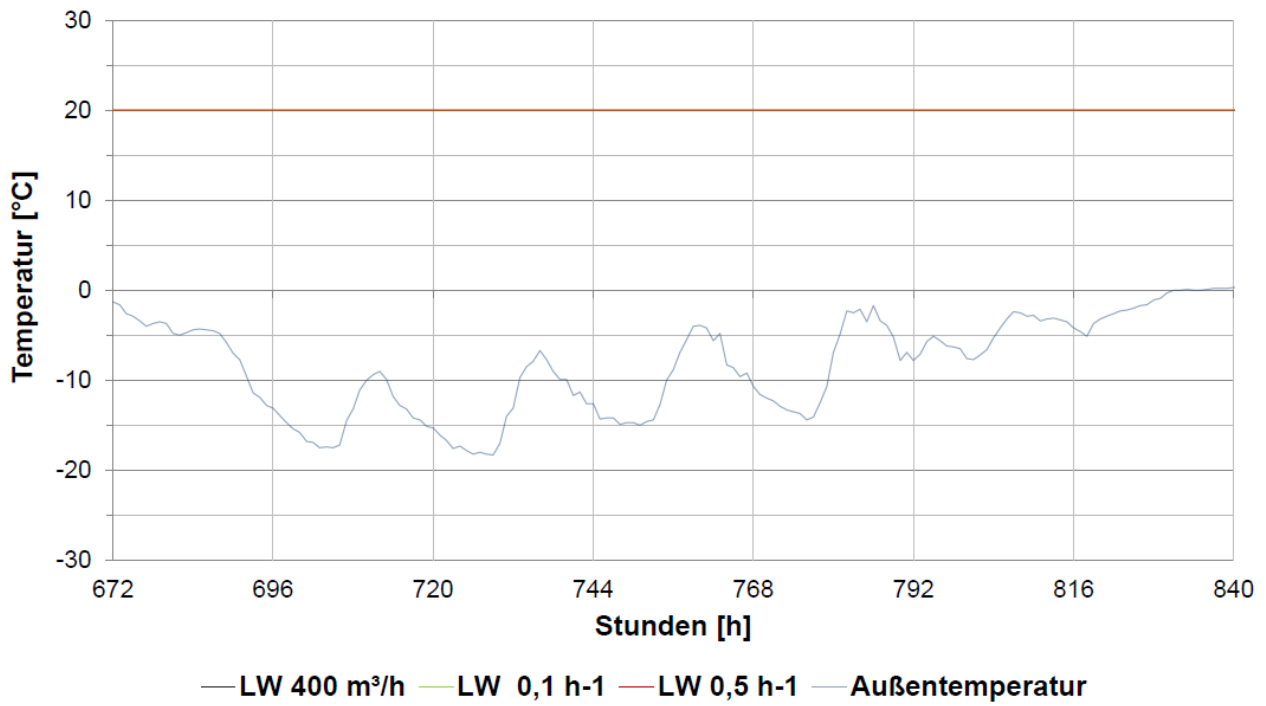


Abbildung A2.44: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten

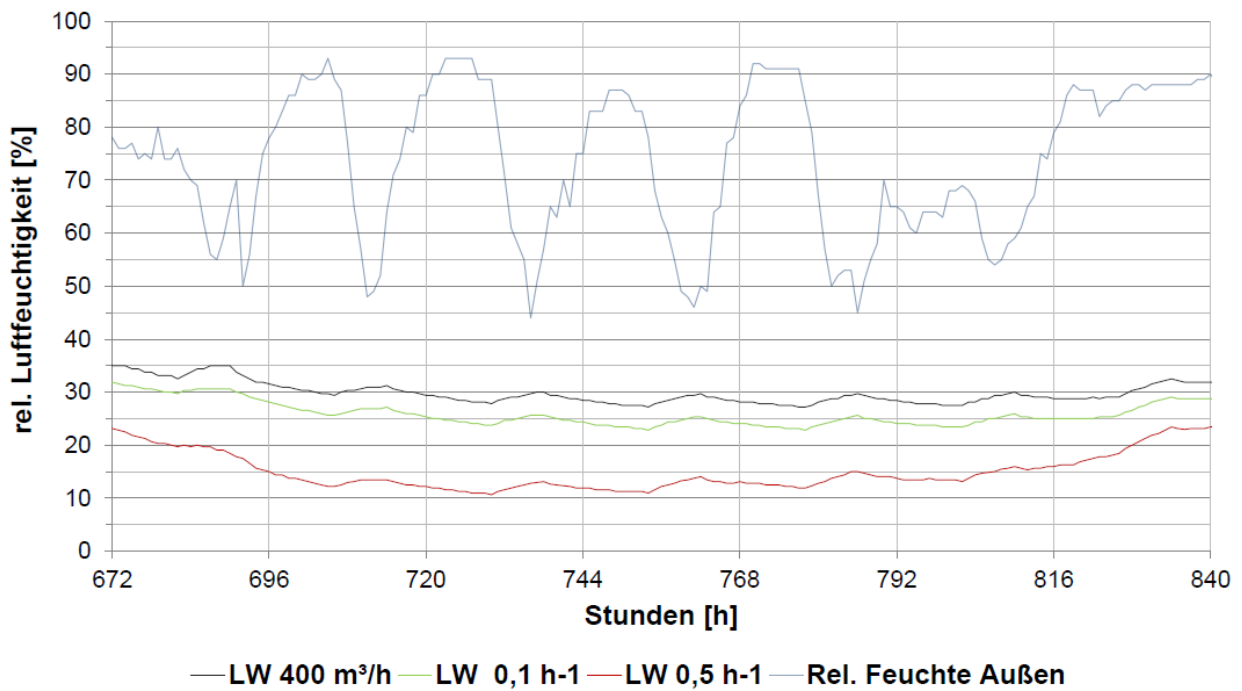


Abbildung A2.45: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten

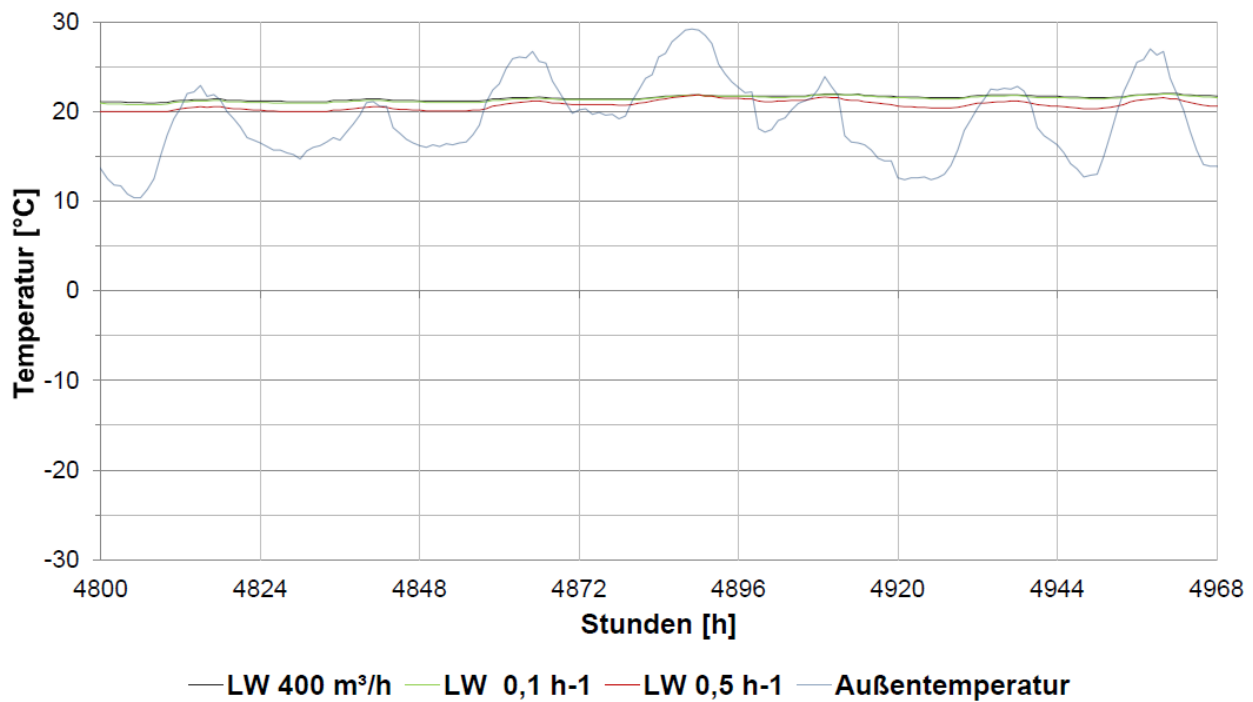


Abbildung A2.46: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten

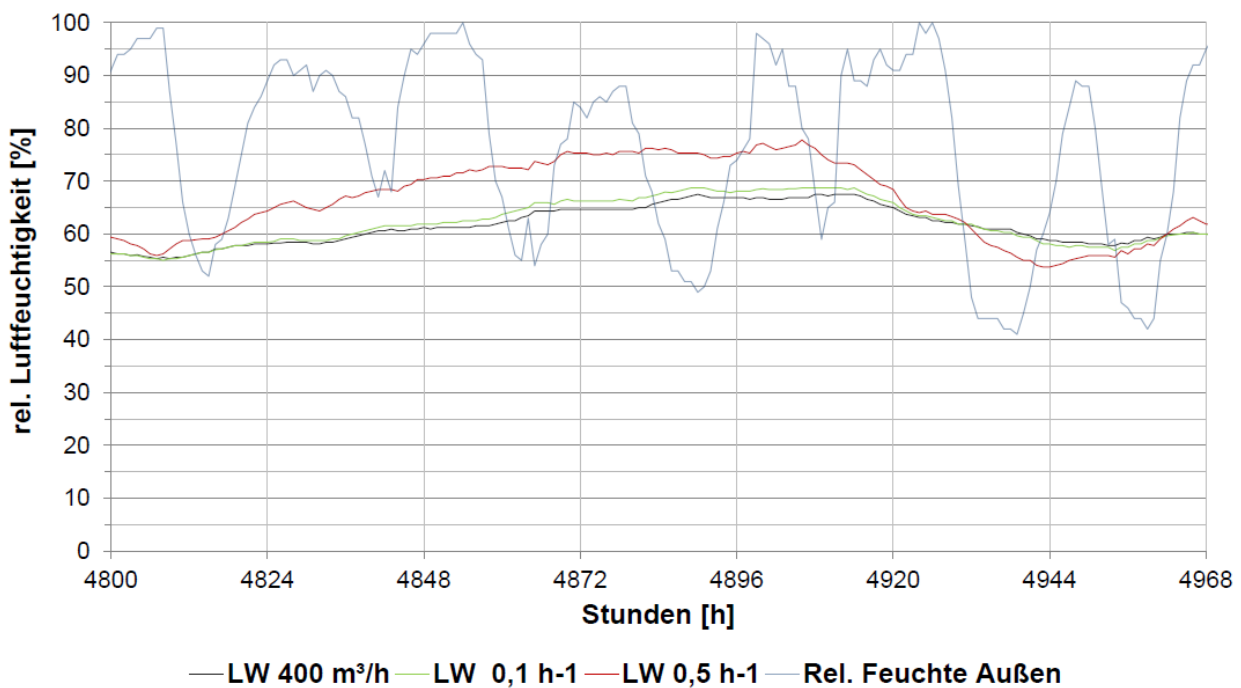


Abbildung A2.47: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum unterschiedliche Luftwechselraten

### 1.7 Parameterstudie zur Zonierung des Ausstellungsbereichs (Abschlussbericht 7.2.1)

Der Ausstellungsbereich soll ein Ort großer Klimakonstanz sein, welche mit möglichst geringem haustechnischen Zusatzaufwand sichergestellt werden soll. Der Raum und das dort herrschende Raumklima dienen dem Schutz der dortigen Ausstellungsstücke. Der gesellschaftliche Auftrag eines Museums ist es aber auch, Menschen an den dort aufbewahrten Kulturgütern teilhaben zu lassen,

zumindest visuell. Damit verbunden ist die willkommen heißende Geste, die ein Museumsgebäude innehaben sollte. Besucher wünschen sich Transparenz und Licht sowie möglichst direkten Zugang. Innerhalb dieser Parameterstudie soll der Frage nachgegangen werden, welche raumklimatischen Auswirkungen eine großflächige Glasfassade (ca. 250 m<sup>2</sup>; U=0,8 W/m<sup>2</sup>K, g =0,4) als Raumabschluss der Ausstellung besitzt im Vergleich zu einem Ausstellungsraum aus gänzlich opaken Umschließungsbauteilen mit vorgeschalteter Pufferzone durch Einbau einer massiven Trennwand aus 60cm Stampflehm (siehe Kapitel 5.1).

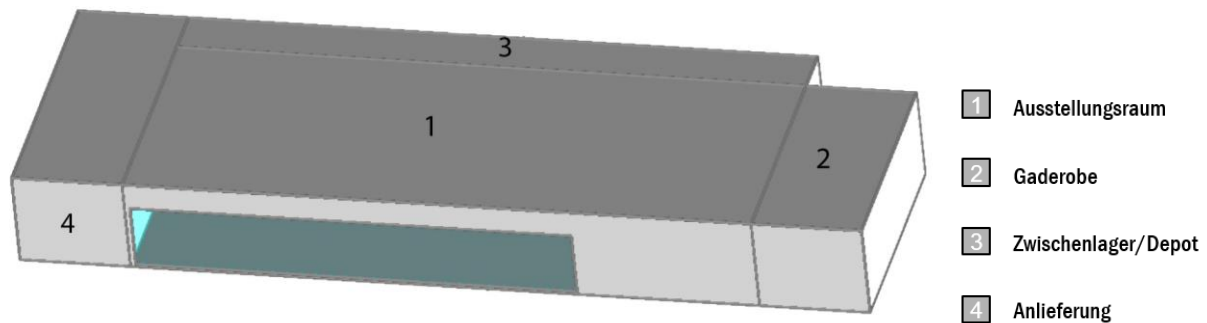


Abbildung A2.48: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus ohne Vorzone (Ausstellung (1) mit großer Verglasung)

Als interne Lasten werden durchgängig 20 Personen während der Öffnungszeiten modelliert, die einen personenbezogenen Außenluftvolumenstrom von 400 m<sup>3</sup>/h. Die Untersuchung erfolgte unter Verwendung des Testreferenzjahres für Kassel - Extremer Sommer.

In den Abbildung A2.49 bis Abbildung A2.54 sind die Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte für innen und außen als Jahres- und Wochenverläufe für die Varianten

- mit über eine Trennwand vom Ausstellungsbereich abgegrenzten Vorzone (dem sogenannten Open-Space-Bereich)
- ohne Vorzone und Trennwand, was einen größeren Ausstellungsbereich bedeutet (Abbildung A2.48).

Die Jahresverläufe machen deutlich, dass die Abspaltung einer Vorzone in erheblichem Maße zur Reduzierung deutlich überhöhter Innentemperaturen beiträgt. Im eigentlichen Ausstellungsbereich ohne Vorzone liegen die sommerlichen Höchsttemperaturen mit bis zu 29°C um bis zu 5 K höher als in dem mit vorgeschaltetem Open-Space. Dann liegen die Maximalwerte nur bei gut 24°C. Zudem schwanken die Temperaturen ohne Vorzone über den Tag um ca. 2 K, mit Vorzone sind die Schwankungen im Ausstellungsraum hingegen marginal.

Dies ist damit zu erklären, dass bei Abspaltung der Vorzone die solaren Lasten den hochwertigen Ausstellungsbereich nur untergeordnet tangieren. Außerdem wirkt die eingebrachte Stampflehmwand aufgrund ihrer Massivität zusätzlich in thermischer und hygrischer Hinsicht stabilisierend auf das Raumklima ein.

Bei gleichhohen Feuchtelasten in beiden Varianten und reduziertem Luftwechsel bewirken die hohen Lufttemperaturen im nicht unterteilten Ausstellungsraum vergleichsweise niedrige relative Raumluftfeuchten im Sommer.

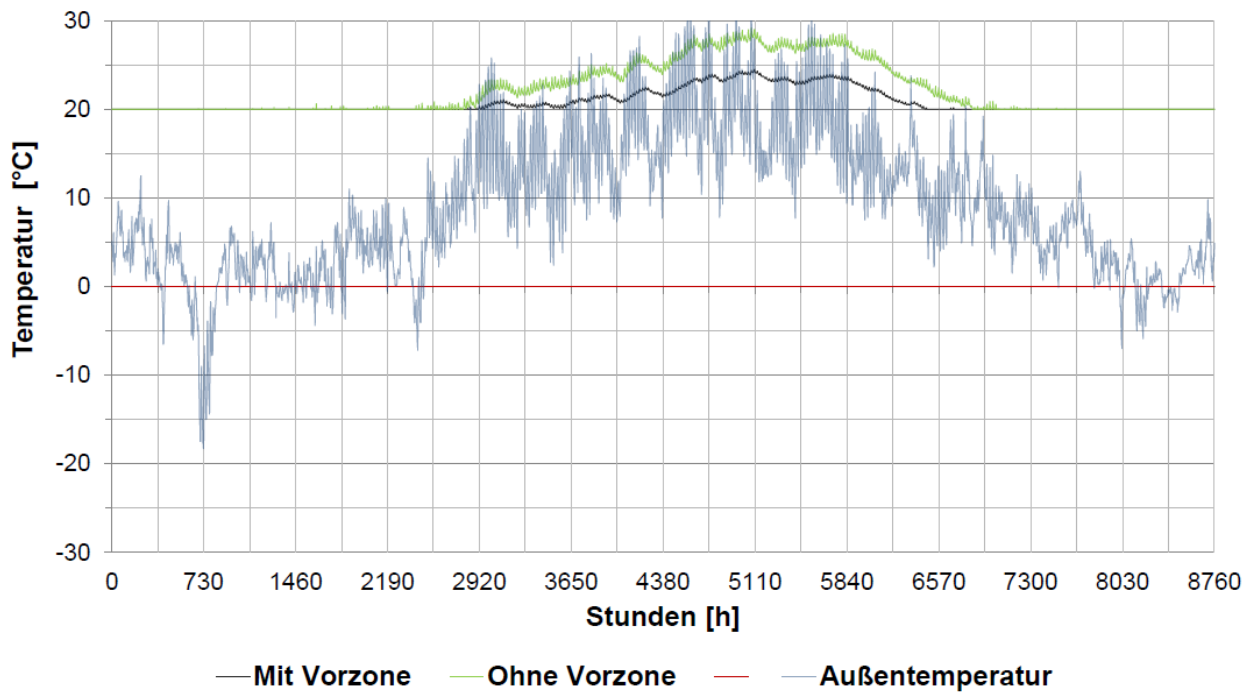


Abbildung A2.49: Jahresübersicht der resultierenden Temperaturen im Ausstellungsraum mit und ohne Vorzone

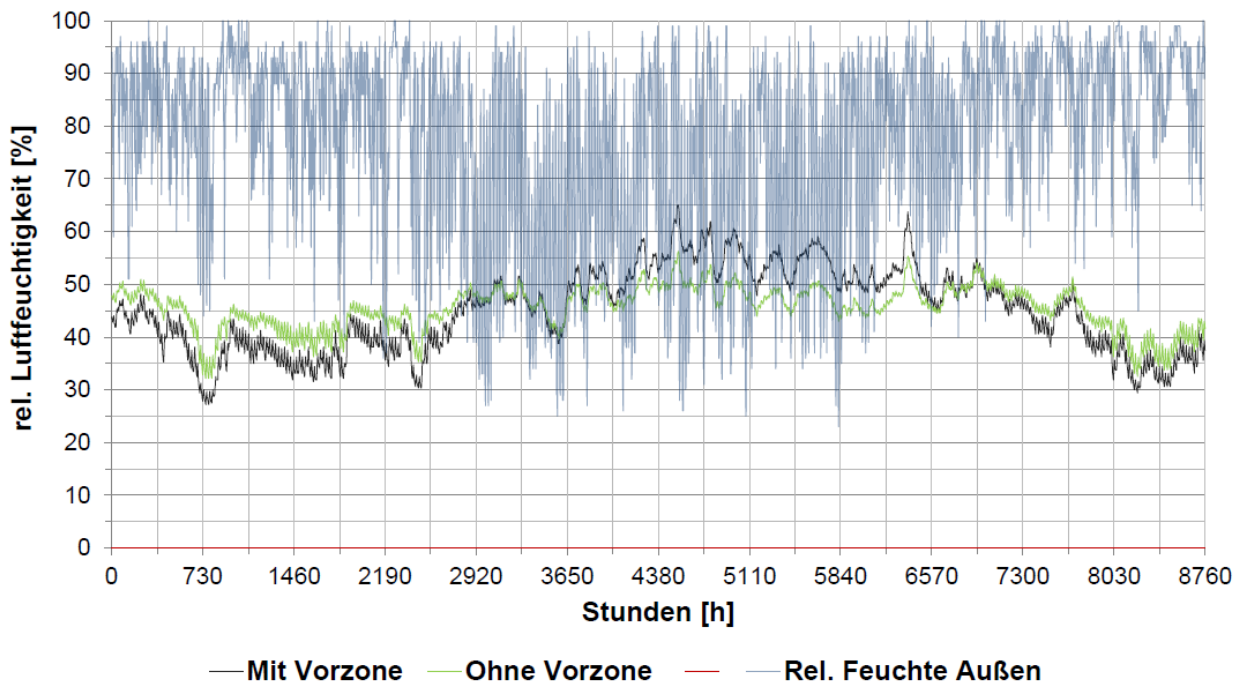


Abbildung A2.50: Jahresübersicht der resultierenden relativen Feuchte im Innenraum mit und ohne Vorzone



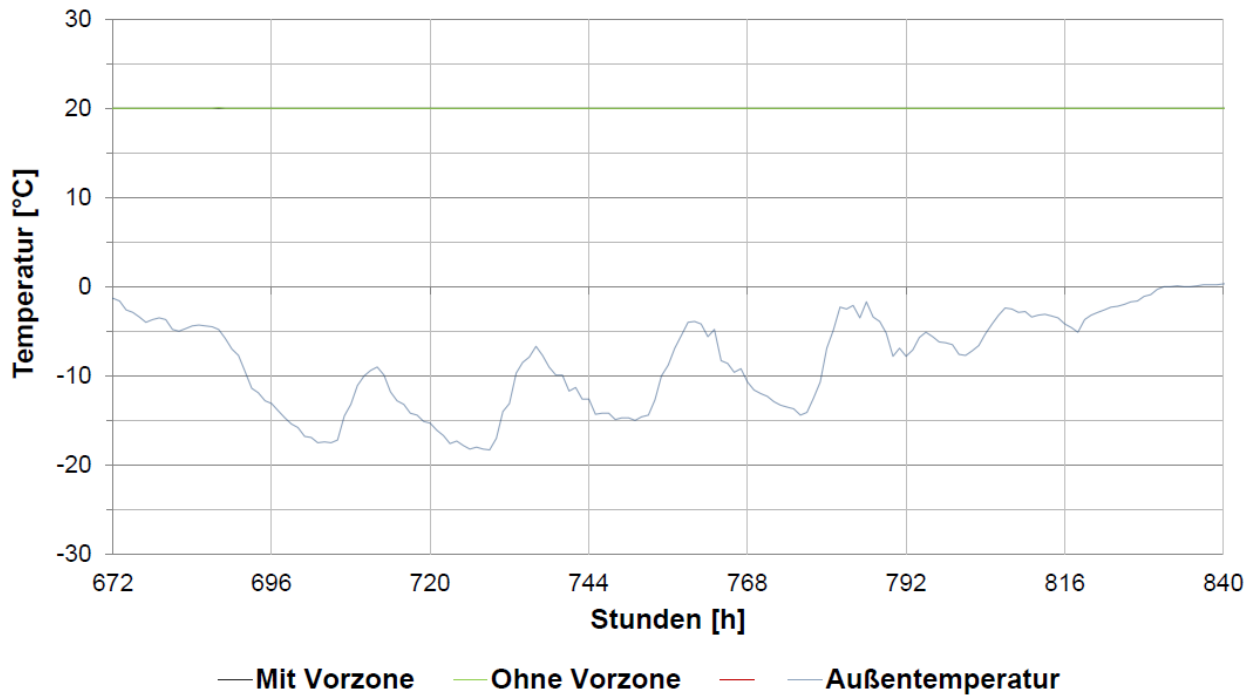


Abbildung A2.51: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit und ohne Vorzone

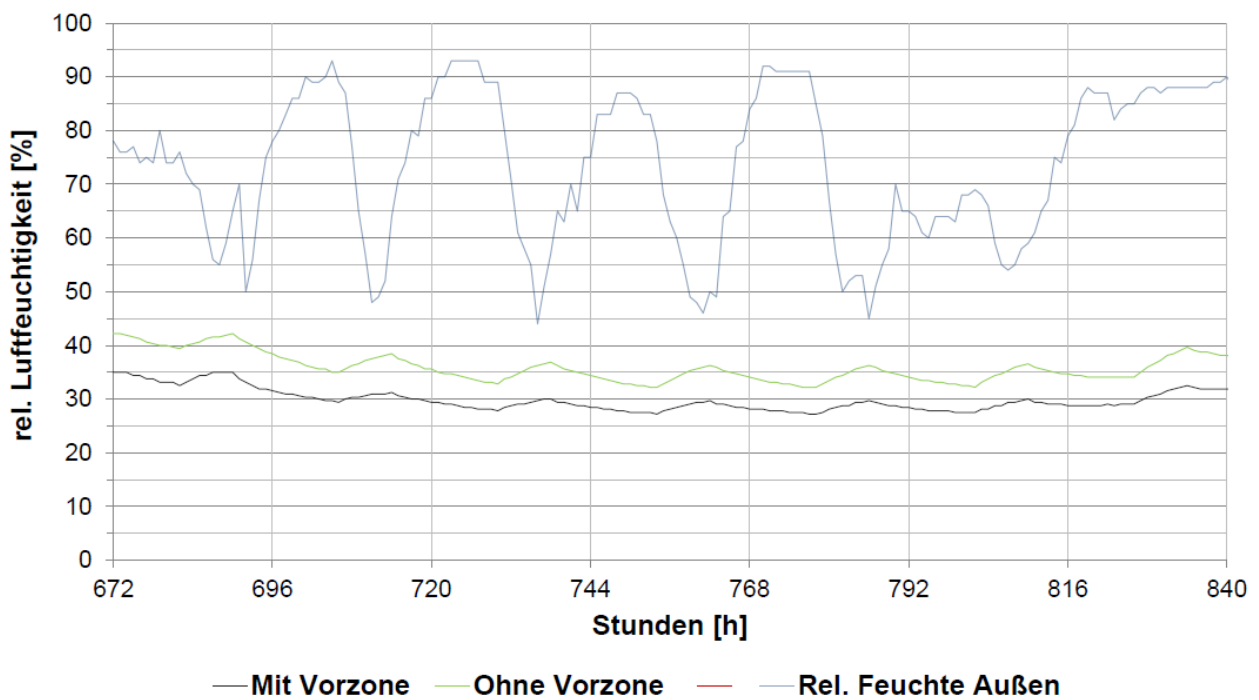


Abbildung A2.52: Wochenübersicht vom 29.01. bis zum 04.02. der resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit und ohne Vorzone

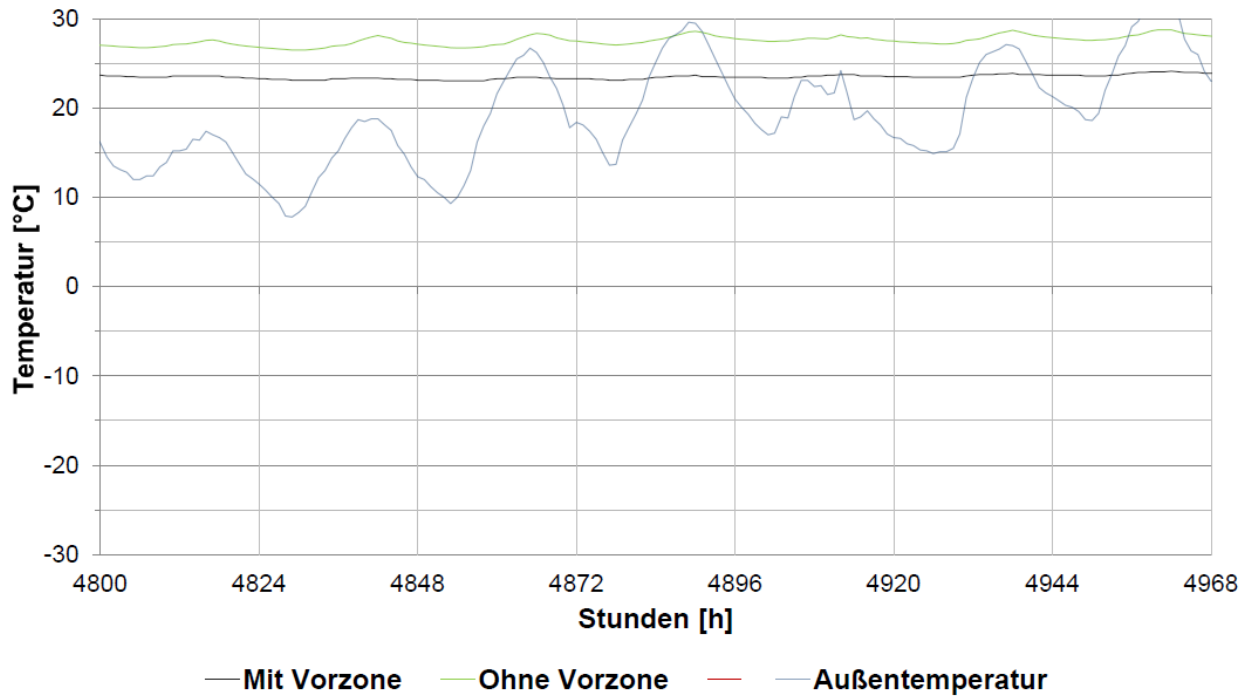


Abbildung A2.53: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. der resultierenden Temperaturen im Innenraum mit und ohne Vorzone

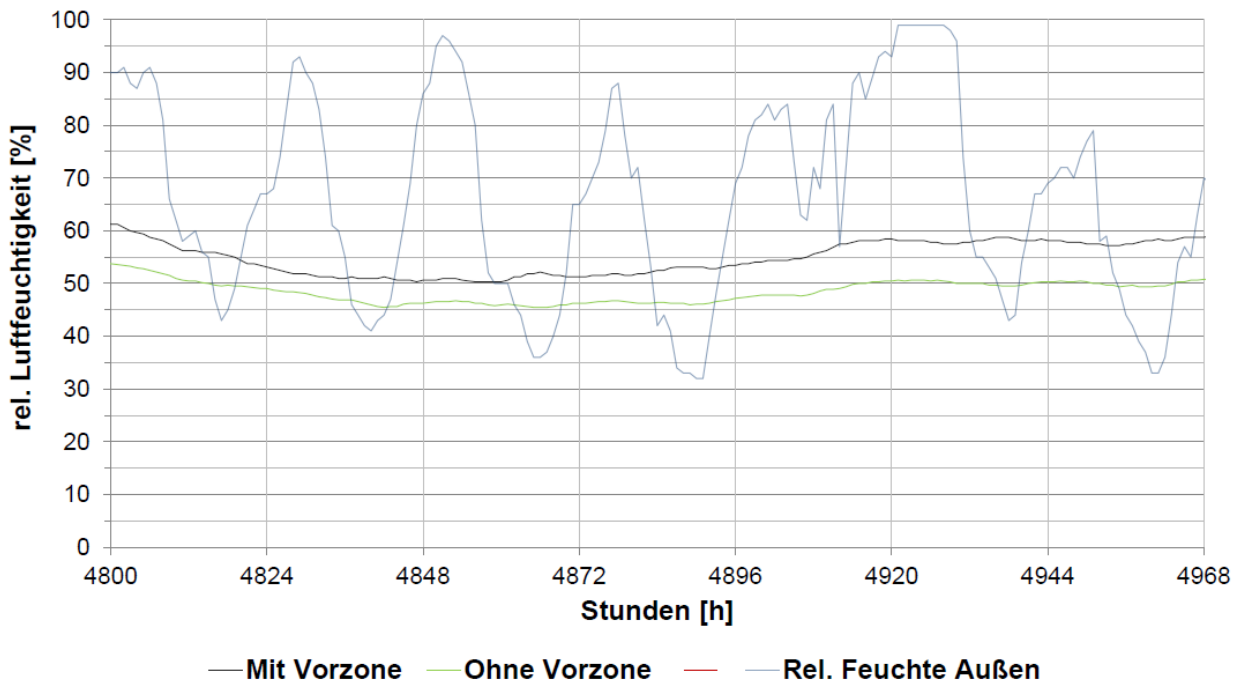


Abbildung A2.54: Wochenübersicht vom 19.07. bis zum 25.07. resultierenden relativen Luftfeuchte im Innenraum mit und ohne Vorzone

## **2 Bauklimatisches Potenzial des Erdreiches (Abschlussbericht 5.1.4, 7.2.2 und 7.2.3)**

### **2.1 Grundgedanke**

Für Gebäude, die auf größerer, kompakter Fläche in direktem Kontakt zum Erdreich stehen, kann eine bewusste Reduzierung der wärmeschutztechnischen Maßnahmen bei der Planung erdberührter Bauteile sinnvoll sein, um die Nutzung der thermischen Speicherfähigkeit des Erdreichs als passive, bauklimatische Maßnahme im Sinne eines über das Jahr ausgeglichenen Raumklimas sowie eines energieoptimierten Gebäudebetriebs zu ermöglichen. Diese Fragestellung wird unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen Simulationssoftware betrachtet. Dazu werden zunächst Vorgaben zu Einflussgrößen der Wärmespeicherung und des Wärmeflusses unter Gebäuden, welche sich unter anderem aus den derzeit gültigen DIN-Normen (vgl. DIN 4108-2; DIN EN ISO 10211) ergeben, einerseits sowie dokumentierte internationale Monitoring-Projekte zum Thema andererseits zusammengetragen. Unter Berücksichtigung des tatsächlichen Planungsstandes dienen normkonforme, numerische Berechnungen zu den betrachteten thermischen Verhältnissen mithilfe der Simulationssoftware PHYSIBEL VOLTRA zur Durchführung einer Sensibilitätsanalyse. Aus den Ergebnissen werden abschließend Empfehlungen in Bezug auf die wärmeschutztechnische Ausführung von Museumsbauten im Allgemeinen sowie für das konkrete Neubaufvorhaben am LWL-Freilichtmuseum Detmold abgeleitet.

### **2.2 Internationale Monitoring-Projekte**

Im Folgenden werden zwei internationale Monitoring-Projekte aus der Wein- und Schaumweinherstellung in Österreich beziehungsweise Italien vorgestellt, in dessen Rahmen das Erdreich mit seiner thermischen Speichermasse als ein Beitrag zu einer passiven Konditionierung der Produktionsräume in Betracht gezogen wurde. Die Sollwerte der Lagertemperaturen für die Weinproduktion liegen demnach in einem Bereich zwischen 9 °C und 20 °C, jedoch bei einer maximalen Temperaturschwankung von 6K sowie einer relativen Luftfeuchtigkeit von maximal 70 % (vgl. Tinti, Barbaresi u.a. 2015: S. 275). Sekt sollte hingegen während der Reifezeit in einem noch enger gespannten Temperaturbereich zwischen 8 °C und 14 °C gelagert werden, wobei eine Maximaltemperatur von 14 °C in keinem Fall überschritten werden darf (vgl. Gratzl, Zieser u.a. 2019: 60).

Simulationsberechnungen zu einem in der österreichisch-ungarischen Grenzregion am Standort Burgenland geplanten Neubau einer Produktionsstätte für Sekt und Schaumwein haben ergeben, dass der Einsatz passiver Erdreichkühlung für die Konditionierung von Lager- und Produktionsbereichen als alleinige Kühlmaßnahme in der Regel nicht ausreichend ist, jedoch eine sinnvolle Ergänzung darstellen kann. Um die Pufferwirkung der thermischen Speichermasse des Erdreichs zu aktivieren wurde eine in weiten Teilen ungedämmte Ausführung erdberührter Bauteile berücksichtigt.

Der Effekt einer passiven Erdreichkühlung kann erreicht werden, wenn die Bodenplatte mindestens 3m unter dem angrenzenden Geländeniveau liegt und sämtliche Außenwände bis zu einer Tiefe von 2m mit einer Dämmung versehen werden. Gleichzeitig muss die oberirdische Gebäudehülle hohen thermischen Anforderungen entsprechen, um eine ausreichende Reduzierung der Wärmeeinträge im Sommer zu bewirken (vgl. Gratzl, Zieser u.a. 2019: 66). Weil eine Phasenverschiebung von in etwa drei Monaten erst im April auftretende Minimaltemperaturen im Erdreich zur Folge hat, kann das angrenzende kühle Erdreich im Sommer als Wärmespeicher dienen. So kann es große Wärmemengen aus dem Gebäude aufnehmen und damit einen passiven Beitrag zur Kühlung leisten. Im Winter kann die gespeicherte Wärme wieder an das Gebäude abgegeben und damit ein passiver Beitrag zur Beheizung geleistet werden (vgl. Gratzl, Zieser u.a. 2019: 62). Als weiteres Ergebnis geht aus der Einzelfallbetrachtung hervor, dass die Veränderung der thermischen Eigenschaften

des Erdreichs, im Speziellen die Veränderung von Speicherkapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit maßgebliche Unterschiede in den Berechnungsergebnissen bewirken. Dennoch werden diese Eigenschaften in geothermischen Gutachten in der Regel nicht näher untersucht, sodass keine detaillierten Berechnungen möglich sind (vgl. Gratzl, Zieser u.a. 2019: 62).

In einer weiteren Fallstudie wurden die zeitlichen Temperaturschwankungen für Bodenschichten, die in Wechselwirkung mit unterirdischen Räumen stehen, am Beispiel eines einfachen Weinkellers in der Region Emilia Romagna (Italien) untersucht. Dieser liegt dabei mit dem Fußboden 2.90 m unter dem anschließenden Geländeniveau und ist bei einer Länge von 9.80 m sowie einer Breite von 5.80 m im Lichten 2.50 m hoch. Die Außenwände des natürlich belüfteten Kellerraums bestehen aus 25 cm starkem Ziegelmauerwerk. Während die 30 cm starke Kellerdecke aus Hohlbeton an die oberhalb befindlichen Warmräume grenzt besteht der Fußbodenaufbau aus gebrannten Tonziegeln, die auf einer 20 cm starken Betonsohle liegen (vgl. Tinti, Barbaresi u.a. 2015: 276). Die Auswertung verschiedener Messpunkte im Erdreich hat im Rahmen der betrachteten Studie gezeigt, dass mit zunehmender Tiefe im Erdreich der maximale Temperatureauschlag abnimmt. Weiterhin wird die Phasenverschiebung zwischen den im Luft- beziehungsweise im Erdbereich auftretenden Extremtemperaturen bei zunehmender Tiefe im Erdreich immer größer, sodass die Extrema immer später auftreten (vgl. Tinti, Barbaresi u.a. 2015: 277). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der Einfluss des Gebäudes in 2m unterhalb des Kellerbodens liegenden Erdschichten Temperaturschwankungen zwischen 16 °C und 18 °C zur Folge hat und damit eine thermische Stabilität im flachen Untergrund bewirkt (vgl. Tinti, Barbaresi u.a. 2015: 284). Im Innenraum des untersuchten Weinkellers bewegen sich die Temperaturen, die stark von den darüber liegenden Warmräumen beeinflusst werden und insbesondere in der Höhe variieren, zwischen 20 °C und 25 °C. Sie liegen damit im Sommer deutlich über den erforderlichen Temperaturen von 9 °C bis 20 °C. Daher wird empfohlen, den Wärmeaustausch zwischen Erdreich und erdberührten Bauteilen zu maximieren. Weiterhin sollte die Kellerdecke mit einer Wärmedämmung versehen werden, um die Lagerräume von den angrenzenden Warmräumen abzukoppeln (Tinti, Barbaresi u.a. 2015: 284).

### **2.3 Modellannahme**

Das auf Grundlage der geometrischen Kennwerte des Ausstellungsgebäudes definierte Modell soll wie folgt beschrieben werden: Aus den Abmessungen des geplanten Ausstellungsgebäudes ergibt sich für das abstrahierte Modell ein rechteckiger Gebäudekörper mit einer Länge von 60 m, einer Breite von 30 m sowie einer Gesamthöhe von 9.90 m. Neben der Bruttogeschossfläche von 1800 m<sup>2</sup> resultiert auch ein Gesamtumfang von 180 m und damit ein charakteristisches Bodenplattenmaß B von 20 m. Sonstige geometrische Randbedingungen, welche die an den Ausstellungsbereich grenzenden Zonen beschreiben und im Detail sowohl dem Entwurf als auch den örtlichen Gegebenheiten entsprechen, sollen im Modell keine Berücksichtigung finden (in Südwestrichtung längsseitig angrenzendes Erdreich sowie die angrenzenden Warmräume im Bereich Garderobe).

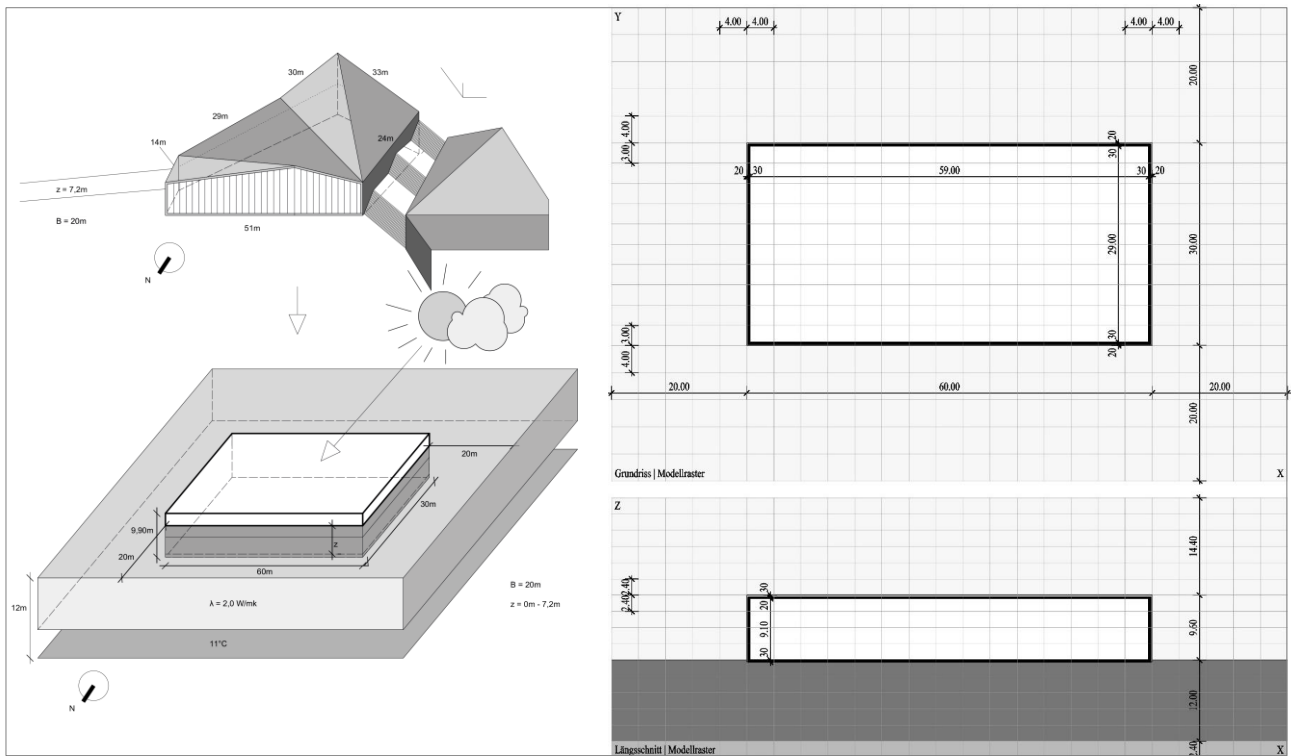


Abbildung A2.55: Abstraktionsmodell und Modellannahme - Aufbau und Raster des Grundmodells

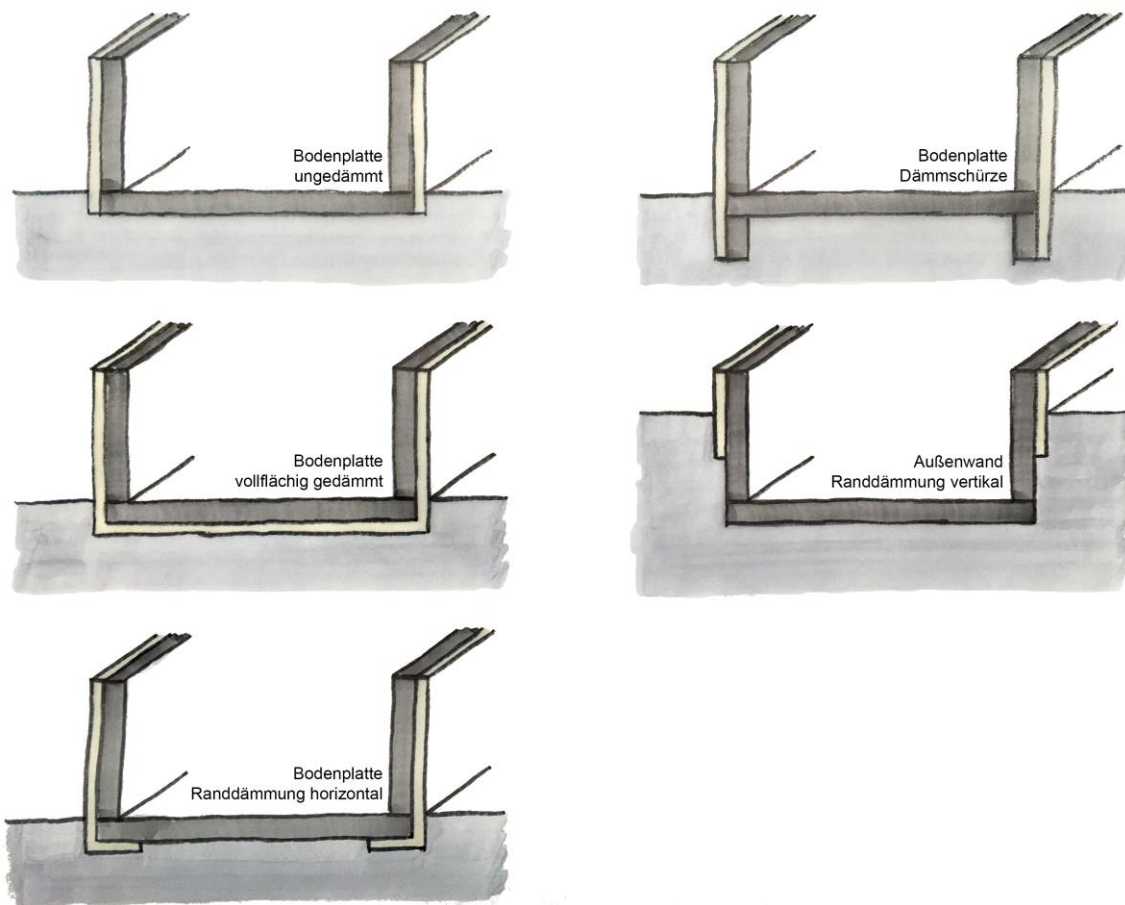


Abbildung A2.56: Piktogramm der Simulationsvarianten

So wird ermöglicht, dass nach Abschluss der Parameterstudie auch allgemeine Empfehlungen für vergleichbare Projekte ausgesprochen werden können. Es wird daher zunächst von einem Gebäu-

dekörper ausgegangen, bei dem - mit Ausnahme der im Ausgangsmodell 30 cm starken, ungedämmten Stahlbeton-Bodenplatte - sämtliche Außenbauteile direkt an die Außenluft grenzen, sodass der Wärmeaustausch zwischen Innenraum und Erdreich beziehungsweise Außenluft, der über die Bodenplatte verläuft, im Detail betrachtet wird.

Für die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs wird entsprechend der DIN EN ISO 10456 „Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften“ ein Wert von 2,0 W/mK angenommen. Die im Bereich des Detmolder Freilichtmuseum angetroffenen kalkmergelhaltigen Gesteinschichten lassen für die Wärmeleitfähigkeit einen deutlich höheren Wert von mindestens 2,50 W/mK vermuten, welcher jedoch zur Wahrung der normativen Vorgaben sowie aufgrund einer besseren Vergleichbarkeit unberücksichtigt bleiben soll. Sowohl für die Geschossdecke als auch für die Außenwände werden hohe Dämmstandards angenommen, welche den für diese Bauteile typischen U-Werten entsprechen. So werden die Außenwände mit einer 30 cm starken, tragenden Innenschicht aus Stahlbeton und einer außenseitig angeordneten, 20 cm starken Dämmschicht, Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/mK ( $U = 0,167 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Hingegen wird für die Gebäudedecke ein Aufbau angenommen, der sich aus einer innenliegenden 20 cm starken Stahlbetondecke mit einer ebenfalls außenseitig angeordneten 30 cm starken Dämmschicht, WLG 035 ( $U = 0,114 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Sämtliche wärmespezifischen Materialeigenschaften, welche im Programm Voltra definiert werden müssen, werden entsprechend der DIN EN ISO 10456 „Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften“ angenommen und, wenn erforderlich, interpoliert. Im Ausgangsmodell werden zunächst keinerlei Fensterflächen, Innenwände und weiterhin auch keine internen Wärmequellen berücksichtigt. Vielmehr wird von einem leeren, im Lichten 29m x 59m x 9,10 m großen Innenraumvolumen mit einem Innenvolumen  $V$  von 15570 m<sup>3</sup> ausgegangen, in dem sich die Innenlufttemperatur frei einstellen kann (Abbildung A2.55). Demnach kann mithilfe des Ausgangsmodells festgestellt werden, welche Temperaturen sich durch den zwischen Außenluft, Erdreich, Bodenplatte und Innenraum herrschenden Wärmeaustausch im Innenraum einstellen. Außerdem werden für das Ausgangsmodell die Klimadaten des TRY Normaljahr 2015 zugrunde gelegt. Als weitere Randbedingung wird eine natürliche Verschattung in einem Winkel von 5° am Horizont angenommen, welches einem circa 10 m hohen Baumbestand in einer Entfernung von rund 100 m entspricht.

## 2.4 Tiefenlage im Erdreich

In der folgenden Abbildung ist die Temperaturentwicklung im Erdreich sowie im Innenraum für unterschiedliche Gebäudelagen im Erdreich gegenübergestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass der Temperaturbereich zentral unter der Bodenplatte (0.30 m Tiefe) für sämtliche Betrachtungen ein wenig enger gespannt ist als die Temperaturschwankung im Innenraum, wobei sich ein ähnlicher Kurvenverlauf erkennen lässt. Ein Temperaturverlauf stellt sich demnach im Erdreich grundsätzlich etwas gleichmäßiger dar als im Innenraum.

Je tiefer das Gebäude insgesamt im Erdreich situiert ist, desto geringer sind die Innentemperaturschwankung sowohl im Sommer als auch im Winter zu erwarten. Grenzt nur noch die Deckenfläche des Gebäudes an die Außenluft, kann die Temperaturschwankung im Vergleich zur Ausgangssituation sogar um insgesamt knapp 4K reduziert werden. Für eine Tiefe im Erdreich von 3,60 m ergibt sich eine um 3 K geringere Temperaturspanne.

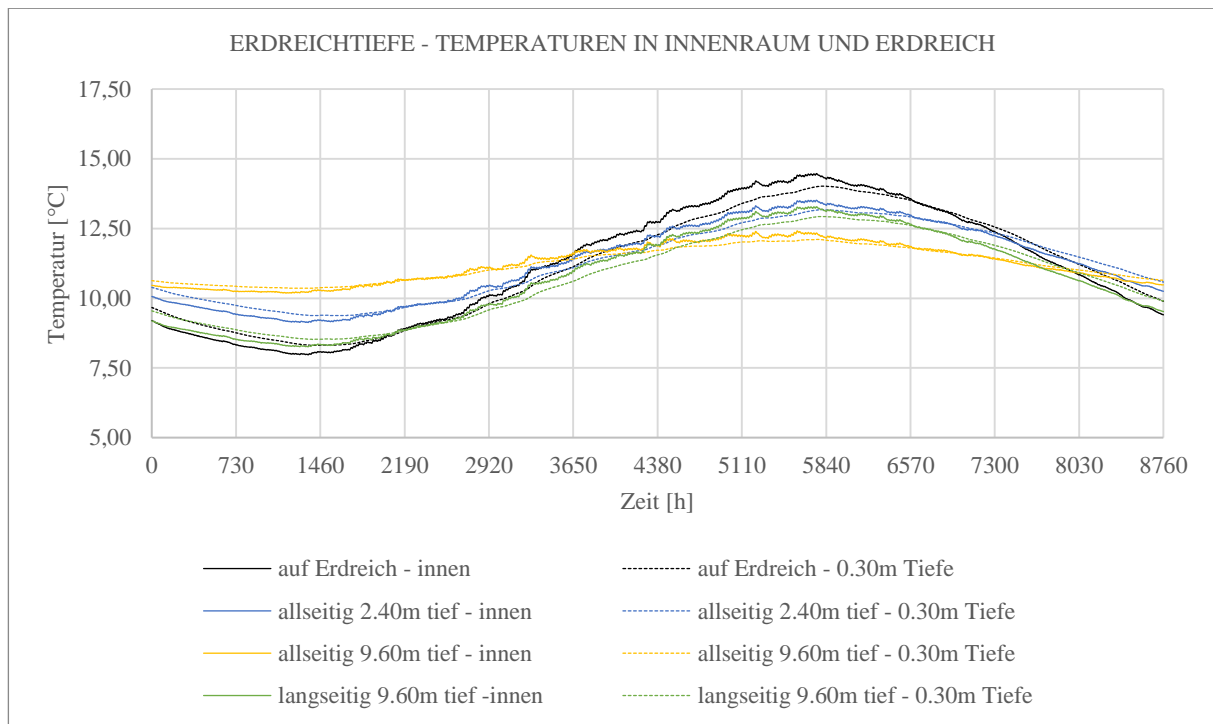


Abbildung A2.57: Temperaturen in Innenraummitte (oben und unten – Mittelwert) und Erdreich (in 0.30 m Tiefe Gebäudemitte) für verschiedene Gründungstiefen

## 2.5 Erdberührte Bodenplatten

Durch Vergleich der Simulationsergebnisse bei unterschiedlichen Dämmmaßnahmen der erdberührten Bodenplatte lässt sich erkennen, dass die Innentemperaturen für eine ungedämmte sowie für eine vollflächig gedämmte Bodenplatte z.T. deutlich über den Temperaturen unter der Bodenplatte liegen. Dabei steigt die Differenz bei zunehmender Dämmstärke an, sodass auf einen immer geringeren Wärmeaustausch zwischen Innenraum und Erdreich geschlossen werden kann.

Weiterhin zeigt die Parameterstudie, dass die Temperaturverhältnisse bei unterschiedlichen horizontalen Randdämmmaßnahmen insgesamt sehr ähnlich sind, Dämmstreifen ab 2 bis 3m Breite zeigen eine gute Wirkung. Die gemäß der DIN V 4108-6 erforderliche Breite von 5.00 m ist hingegen leicht unvorteilhaft, weil sie den Wärmeaustausch auf einer wesentlichen Bereiche der Bodenplattenoberfläche verhindert.

Bei Betrachtung von vertikalen Randdämmungsvarianten fällt auf, dass bereits eine 1,20 m tiefe Dämmschürze einen deutlichen, positiven Effekt auf die Temperaturschwankungen im Innern nimmt. Ausgehend von einer auf einem Schotterplanum ausgeführten Plattengründung mit außenseitigen Frostschrägen, die ohnehin eine Tiefe von 0,80 m erfordern, müssten diese nur wenig tiefer geführt und außenseitig gedämmt werden, ohne dass ein zusätzlicher Arbeitsschritt erforderlich wird. Eine darüberhinausgehende Tiefe der Dämmschürze hat zwar leicht geringere Schwankung der Innentemperatur zur Folge, wird jedoch als eher unwirtschaftliche Maßnahme bewertet.

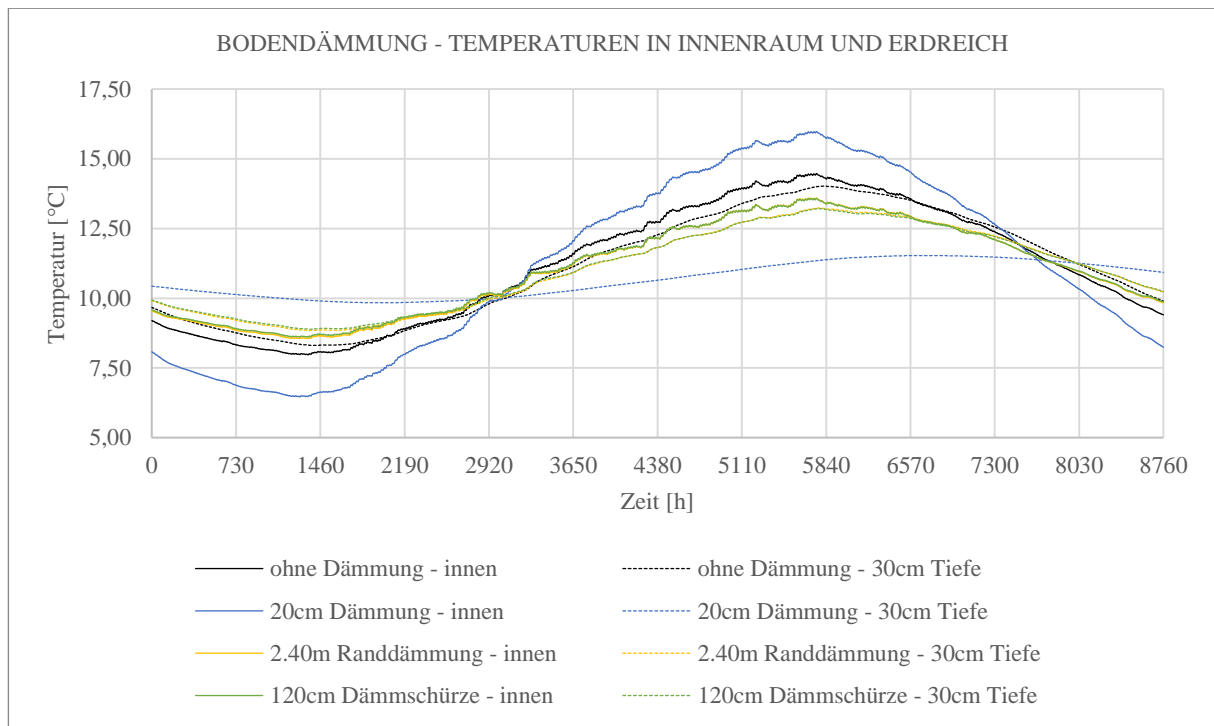


Abbildung A2.58: Temperaturen in Innenraummitte (oben und unten – Mittelwert) und Erdreich (in 0.30 m Tiefe Gebäudemitte) für verschiedene Dämmmaßnahmen



### 3 Steigerung der Raumluftqualität durch Pflanzen (Abschlussbericht 6.4.1)

Im Laufe ihres gesamten Lebens atmen Menschen durchschnittlich 350.000 kg Luft ein (Tabelle A2.1.) - deutlich mehr als sie Nahrungsmittel und Wasser aufnehmen. Deshalb ist eine schadstoffarme Atemluft sowohl in Außen- als auch in Innenräumen für die Gesundheit und das Wohlbefinden überaus wichtig.

Tabelle A2.1: Umsatz und Entzugsdauer von "Lebensmitteln" (TAPPLER, o.J.)

	Nahrung	Wasser	Luft
Umsatz eines Menschenlebens	35.000 kg	70.000 kg	350.000 kg
Maximale Entzugsdauer	ca. 50-80 Tage	ca. 3-5 Tage	ca. 3 Minuten

Intensives Lüften mittels RLT oder Fensterlüftung steigert i.A. die Luftqualität, bringt jedoch Schwankungen der Raumlufttemperatur und –feuchte sowie erhöhte Kosten für Heizung und ggf. Kühlung mit sich.

Eine „schonendere“ Möglichkeit das Raumklima zu verbessern, stellen dabei Zimmerpflanzen dar. Sie können die Luftfeuchtigkeit regulieren, Schadstoffe aus der Raumluft filtern und sogar das allgemeine Wohlbefinden beeinflussen.

Die allgemeinen luftreinigenden Eigenschaften von Zimmerpflanzen im Hinblick auf die Entfernung von Schadstoffen aus der Raumluft wurden bereits mehrfach belegt (NASA 1989, Wolverton 1993). Jede Pflanze besitzt zudem die Fähigkeit, Kohlenstoffdioxid zu fixieren und Sauerstoff zu produzieren; in welchem Maße dies bei Zimmerpflanzen erfolgt, ist jedoch weitestgehend unbekannt.

Teilziel unserer Untersuchung ist es daher, die Wirksamkeit von Zimmerpflanzen im Hinblick auf die Verbesserung des Innenraumklimas zu prüfen. In diesem Zusammenhang werden durch den Vergleich internationaler Forschungen sowie eigenständige Messungen geeignete Zimmerpflanzen zur Verbesserung der Raumluftqualität hinsichtlich der Schadstoffkonzentration und Luftfeuchtigkeit evaluiert.

Die Abgabe von Feuchte in einen Raum erfolgt häufig u.a. durch Zimmerpflanzen. Sie geben das durch Wurzeln aufgenommene Wasser nahezu vollständig durch Transpirationsvorgänge über ihre Spaltöffnungen (Stomata) ab. Dabei spielen die Beleuchtungsverhältnisse eine entscheidende Rolle. So geben Zimmerpflanzen bei eingeschränktem Lichtangebot durch Schließung der Spaltöffnungen weniger Feuchtigkeit ab als bei hoher Beleuchtungsstärke (Bischof et al. 2006; 109). Die durchschnittliche Feuchteabgabe von Zimmerpflanzen ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle A2.2: Zusammenstellung der gemessenen tagesdurchschnittlichen Feuchteabgabe von Zimmerpflanzen (Bischof et al. 2006; 109).

Bezeichnung	Größe	Durchschnittliche Feuchteabgabe
<i>Santpaulia ionantha</i> – Usambaraveilchen	10 cm	0,6 g/h
<i>Chrysalidocarpus lutescens</i> – Goldfruchtpalme	28 cm	0,8 g/h
<i>Ficus benjamina</i> – Birkenfeige	50 cm	0,9 g/h
<i>Opuntia vestita</i> – Feigenkaktus	61 cm	0,9 g/h
<i>Aeonium spec.</i> – Aeonium	55 cm	1,2 g/h
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i> – chines. Roseneibisch	25 cm	1,3 g/h
<i>Pachypodium lamerei</i> – Madagaskarpalme	76 cm	1,3 g/h
<i>Sarracenia</i> (Hybride) – Schlauchpflanze	23 cm	1,4 g/h
<i>Haemanthus albiflos</i> – Elefantenoher	13 cm	1,7 g/h
<i>Crassula ovata</i> – Dickblatt	43 / 70 cm	1,4 / 1,8 g/h
<i>Passiflora caerulea</i> – Passionsblume	40 cm	1,8 g/h
<i>Dieffenbachia</i> – Dieffenbachie	60 cm	2,0 g/h
<i>Monstera deliciosa</i> – Monstera	80 cm	2,2 g/h
<i>Yucca aloifolia</i> – Palmlilie	75 / 80 cm	1,2 / 2,5 g/h
<i>Phoenix canariensis</i> – Kanarische Dattelpalme	140 cm	2,8 g/h
<i>Musa spec.</i> – Banane	45 cm	3,0 g/h
<i>Ficus elastica</i> - Gummibaum	70 / 100 cm	1,1 / 4,4 g/h

### 3.1 Raumklima und CO<sub>2</sub>

Die Gestaltung eines behaglichen Raumklimas z.B. in Büroräumen ist ein sowohl für das Wohlbefinden der Nutzer als auch für die Gesundheit wichtiger Aspekt. Die allgemeinen Richtwerte und Schutzziele beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten sind u.a. in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) definiert. Vor allem die ASR A3.5 *Raumtemperatur* und ASR A3.6 *Lüftung* sind für das Raumklima relevant. Die ASR A3.5 empfiehlt folgende Raumlufttemperatur für Arbeitsumgebungen bei leichter Arbeit:

Tabelle A2.3: Lufttemperatur in Arbeitsräumen (ASR A3.5 2010; 4)

Temperatur	Maßnahmen
+ 20°C	Mindestwert für leichte Hand-/Armarbeit
+ 21°C	Wert für Pausen-, Bereitschafts-, Sanitär-, Kantinen- und Erste-Hilfe-Räume
+ 26°C	Wert sollte nicht überschritten werden, Verwendung geeigneter Sonnenschutzmaßnahmen
+ 30 °C	Ergreifung wirksamer Maßnahmen gemäß Gefährdungsbeurteilung
+ 35°C	Nicht als Arbeitsraum geeignet

Die Lüftung der Arbeitsräume ist in der ASR A3.6 festgelegt. Als Indikator für die Qualität der Raumluft dient Kohlenstoffdioxid. Lüftungsmaßnahmen werden demnach ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.000 ppm gefordert. Der allgemeine Arbeitsplatzgrenzwert von Kohlenstoffdioxid liegt bei 5.000 ppm (Technische Regeln für Gefahrenstoffe 2006; 34).

Die DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.) - *Informationen* enthalten Empfehlungen und praktische Anwendungshinweise für Arbeitsumgebungen aller Branchen. Für die Gestaltung von Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen gilt die DGUV Information 215-410 sowie DGUV Information 215-520. Insgesamt wird die Herstellung eines behaglichen Raumklimas mit folgenden Kriterien empfohlen: maximale relative Luftfeuchte von 50 %, Lufttemperatur von 20°C – 22°C sowie Luftgeschwindigkeit von 0,15 m/s. Dies entspricht den Vorgaben der ASR 3.5 und ASR 3.6. Zudem soll

die Lüftung von Büroräumen über Fenster erfolgen, da „bei freier Fensterlüftung weniger Beschwerden auftreten als bei klimatisierten Büroräumen“ (vgl. DGUV 2015; 73). Bei Abweichungen von den genannten Klimafaktoren ist mit beeinträchtigtem Konzentrationsvermögen und eingeschränkter Leistungsfähigkeit der Büronutzer zu rechnen.

Gehäuftes Auftreten verschiedener Krankheitssymptome kann ein Hinweis auf das sogenannte Sick-Building-Syndrom sein. Obwohl die Ursachen der Erkrankung nicht eindeutig identifiziert werden konnten, ist davon auszugehen, dass ein behagliches Raumklima und schadstoffarme Raumluft positive Auswirkungen auf das Gesundheitsbefinden haben.



Abbildung A2.59: Behaglichkeitsbereich im Büro

Kohlenstoffdioxid (chemische Kurzbezeichnung: CO<sub>2</sub>) ist ein geruchs- und farbloses Gas. Mit einer Konzentration von 0,04% ist es ein natürlicher Bestandteil der Außenluft (vgl. Bundesgesundheitsblatt 2008; 358). Durch Atmungsprozesse von Lebewesen sowie Verbrennungsvorgängen kohlenstoffhaltiger Substanzen kann die CO<sub>2</sub>-Konzentration, besonders in unzureichend gelüfteten Innenräumen, erheblich zunehmen.

Die DIN 13779 und DIN 16798 klassifizieren Innenräume in vier Qualitätsstufen mit unterschiedlichen zulässigen CO<sub>2</sub>-Werten, die in Tabelle A2.4: Zulässige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen zu finden sind. Dabei wurden keine absolute CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft angegeben, sondern die Differenz zur Außenluft. Die derzeit geltende DIN 16798 erhöhte die Werte erheblich. Beide DIN-Normen gelten lediglich für Gebäude mit RLT-Anlagen.

Ausgehend von einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 400 ppm in der Außenluft, wird die Pettenkofer-Zahl, der klassische Grenzwert zur Beurteilung der Luftqualität, von 1.000 ppm teilweise erheblich überschritten. Allgemein gelten jedoch höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Innenraumluft als 1.000 ppm als Indikator für unzureichende Lüftungsraten (vgl. Bundesgesundheitsblatt 2008: 1368). Allerdings garantieren niedrige ppm-Werte nicht zwingend die Entfernung aller schädlichen Stoffe aus der Raumluft. (Deshalb sollten primär Quellen der Verunreinigungen entfernt werden.)

Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten definieren dagegen folgende CO<sub>2</sub>-Richtwerte, die sowohl für Wohn- als auch Nichtwohngebäude gelten:

Tabelle A2.4: Zulässige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen

Kategorie	Zulässige CO <sub>2</sub> -Konzentration oberhalb der Konzentration in der Außenluft	
	nach DIN 13779: 2007-09	nach DIN 16798-1
I	≤ 400	550
II	> 400 -600	800
III	> 600 – 1.000	1.350
IV	> 1.000	1.350

Tabelle A2.5: CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft (ASR 3.6 2012; 4)

CO <sub>2</sub> -Konzentration [ml/m <sup>3</sup> ] bzw. [ppm]	Maßnahmen
< 1.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine weiteren Maßnahmen (sofern durch die Raumnutzung kein Konzentrationsanstieg über 1.000 ppm zu erwarten ist)</li> </ul>
1.000 – 2.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern</li> <li>• Lüftungsplan aufstellen (z. B. Verantwortlichkeiten festlegen)</li> <li>• Lüftungsmaßnahme (z. B. Außenluftvolumenstrom oder Luftwechsel erhöhen)</li> </ul>
> 2.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• weitergehende Maßnahmen erforderlich (z. B. verstärkte Lüftung, Reduzierung der Personenzahl im Raum)</li> </ul>

Nichtsdestotrotz konnte durch zahlreiche Studien (beispielsweise von Wargocki & Wyon (2006): 48. Oder Tiesler et al. (2008)) belegt werden, dass die Absenkung der mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.300 ppm auf 900 ppm zu einer signifikanten Leistungs- und Konzentrationssteigerung führt (vgl. Bundesgesundheitsblatt 2008: 1368). Der in Deutschland üblicherweise zur Beurteilung verwendete Grenzwert von 1.500 ppm ist demzufolge als zu hoch anzusehen.

Aus diesem Grund stuft der Ausschuss für Innenraumrichtwerte (vormals Ad-hoc-Arbeitsgruppe) eine Konzentration von <1.000 ppm als „hygienisch unbedenklich, 1.000 – 2.000 ppm als „hygienisch auffällig und >2.000 ppm als hygienisch inakzeptabel ein. So sind bereits bei Überschreitung des Wertes von 1.000 ppm erhöhte Lüftungsmaßnahmen empfohlen (Bundesgesundheitsblatt 2008; 1368).

Als natürlicher Bestandteil der Luft ist Kohlenstoffdioxid als nicht giftig eingestuft worden (KEK 2011; 4). Nichtsdestotrotz kann eine erhöhte Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Luft zu Befindlichkeitsstörungen wie z.B. Beeinträchtigung von Leistungsfähigkeit, Konzentration und Kopfschmerzen führen, denn es beeinflusst das gesamte Atemzentrum und die Sauerstoffaufnahme-fähigkeit der roten Blutkörperchen. (EIGA 2011; 2)

Obwohl in der heutigen Gesellschaft das Bewusstsein für ein gesundes Wohnklima weiter zu nimmt, gelangen viele Wohngifte unbemerkt in Innenräume -durch neue Farben, Bodenbeläge oder Möbel. Um die Schadstoff-Belastung durch Baustoffe und Ausstattung zu minimieren, sollte bereits bei der Planung und Renovierung von Gebäuden darauf geachtet werden, schadstofffreie, umweltfreundliche Materialien zu verwenden sowie vorhandene, belastete Materialien fachkündig zu entfernen.

Umso mehr steht der Architekt in der Verantwortung die Bauherren sowohl über mögliche Innenraumschadstoffe aufzuklären, als auch die Relevanz des richtigen Lüftens im Hinblick auf eine hygienische Raumluftqualität zu verdeutlichen.

Der größte Emittent von Schadstoffen in Innenräumen ist der Mensch selbst, da die Produktion von CO<sub>2</sub> durch Atmung (und bestimmte Verbrennungsprozesse) die Qualität der Raumluft erheblich verschlechtert (vgl. Fiedler 2013; 7). Dabei spielt eine saubere, unbelastete Raumluft eine entscheidende Rolle für die Gesundheit und das allgemeine Wohlbefinden; denn mehr als zwei Drittel der Lebenszeit halten sich Menschen in Innenräumen auf (Umweltbundesamt, a 2016). Vor allem für Menschen mit geschwächten Abwehrkräften (Kinder, Senioren, Kranke) stellt belastete Raumluft eine besondere Gefahr dar.

Insgesamt wird zwischen folgenden Innenraumschadstoffen unterschieden (Gesamtverband Schadstoffsanierung 2014):

- Organische Schadstoffe
- Anorganische Schadstoffe
- Mineralfasern
- Biologische Gefährdungen
- Strahlung
- Emissionen des Menschen

Kohlenstoffdioxid zählt zu den organischen Schadstoffen, gilt jedoch als Indikator für schlechte Raumluft.

Neben dem CO<sub>2</sub>-Gehalt der Innenraumluft sind bestimmte Richtwerte für die Konzentration von Schadstoffen, die durch den Ausschuss für Innenraumrichtwerte festgelegt und regelmäßig überarbeitet werden, eine weitere übergreifende Hilfe zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen.

Ein Überblick über die wichtigsten Innenraumschadstoffe erfolgt in Tabelle A2.6. Ferner gibt es unzählige weitere chemische oder organische Verbindungen, die einen Einfluss auf die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden haben. Darüber hinaus kommen ständig neue Produkte der Industrie sowie chemische Verbindungen hinzu, dessen Auswirkungen auf den menschlichen Körper noch nicht bekannt sind.

### **3.1.1 Schadstoffe aus Baustoffen und Inneneinrichtungsgegenständen**

Die Themen Raumklima und Raumluftqualität wurden erstmals Anfang der 1970er Jahre wissenschaftlich behandelt (Witthauer et al. 1993; 1). Bis dato war man sich der Gefahr von Innenraumschadstoffen nicht bewusst. So sind viele ältere Gebäude, aufgrund Emissionen aus Baustoffen, Ausbaumaterialien sowie Möbeln und Einrichtungsgegenständen, noch heute stark belastet und können nur aufwändig saniert werden. Auch beim Abriss belasteter Gebäude müssen viele Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Innenraumklima

Während die Verwendung von schadstoffbelasteten Materialien immer stärker zurückgegangen ist und die meisten Baustoffe reglementiert wurden, wird der Luftqualität in Innenräumen weiterhin zu wenig Beachtung geschenkt. Um erhöhte Schadstoffkonzentration in der Raumluft zu vermeiden, sollte bei Neubauten und Sanierungen eine sorgfältige Auswahl emissionsarmer bzw. schadstofffreier Produkte erfolgen. Neben der Vermeidung von Schadstoffquellen ist ein regelmäßiger Luftaustausch ein wesentlicher Punkt für gesunde Raumluft.

Das Missachten von erhöhten Schadstoffbelastungen kann nicht nur zu Schäden am Bau führen (z.B. durch Schimmelpilze), sondern meist auch zu schwerwiegenden, lebenslangen Gesundheitsschäden.

Tabelle A2.6: Übersicht der wichtigsten Innenraumschadstoffe (GESAMTVERBAND SCHADSTOFFSANIERUNG 2014; 535 ff.)

	Vorkommen	Gesundheitsrisiken	Sanierung
Asbest	Dichtungen, Feuer-, Wärme-, und Schallschutzplatten, Gips-, Stuck-, und Zementputze, Estriche, Spachtelmassen, Anstriche, Beschichtungen, Klebstoffe, Dachbahnen,	krebserzeugend verursacht Asbestose	Entfernen, Beschichten, räumliche Trennung, Sachkundenachweis gemäß TRGS 519 erforderlich
Bakterien	Verschmutzte Oberflächen, Böden, Teppiche, Matratzen, Haustiere, Mensch, Pflanzen, Blumenerde, in Vergesellschaftung mit Schimmelpilzen	abhängig von der Bakterienzahl und -art sowie dem Immunstatus des Betroffenen	siehe Schimmelpilze
Blei	Bleiche, Rohrleitungsmaterial, Kabelummantelungen, Anstriche, Batterien	toxisch, Fruchtbarkeitsgefährdend, bioakkumulierend	Ausbau, Reinigung, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich
Carbolineum	Anstriche, Imprägnierungen, Strom- und Telegrafmasten, Zäune	krebserzeugend, erbgutverändernd, immuntoxisch, lebertoxisch, schleimhautreizend	Ausbau, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich
DDT	Anstriche, Holzschutzmittel, Desinfektionsmittel	krebserzeugend, erbgutverändernd, neurotoxisch, bioakkumulierend	Ausbau, Beschichtung, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich

	Vorkommen	Gesundheitsrisiken	Sanierung
Dioxine und Furane	PCB, PCP, Flugasche, Brandrückstände, Chlorbleiche	chronisch toxisch, krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend, neurotoxisch, immuntoxisch, lebertoxisch, bioakkumulierend	Ausbau, Sachkunde gemäß BGR 128 erforderlich, Anzeige bei der zuständigen Berufsgenossenschaft
VOC	Farben, Lacke, Anstriche, Klebstoffe, Grundierungen, Lösemittel	Reizung der Atemwege, Kopfschmerzen, Geruchsbelastung	Lüften, Entfernung der Quellen
Formaldehyd	Holzwerkstoffe, Tabakrauch	krebserzeugend, Reizungen der Augen, Schleimhäute und Atemwege, Kopfschmerzen	Lüften, geringere Raumlufttemperatur und relative Feuchte, Entfernung der Quellen, dampfdiffusionsdichte Beschichtung der Quellen
KMF	Baustoffe und ausbaumaterial, Wärmedämmung, Haustechnik	krebserzeugend, reizend	Ausbau, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004/ TRGS 524 erforderlich
Kupfer	Wasserleitungen, Kabel, Anstriche, Holzschutzmittel	geringe Toxizität	Ausbau, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich
PCP	Anstriche, Konservierungsmittel, Pflanzenschutzmittel, Desinfektionsmittel	krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend, neurotoxisch, immuntoxisch, lebertoxisch, erbgutverändernd, starke akute Toxizität	Ausbau, Beschichtung, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich
PCB	Dichtmassen, Anstriche, Kunstharze, Klebstoffe, Kondensatoren, Weichmacher	krebserzeugend, fortpflanzungsgefährdend, neurotoxisch, immuntoxisch, lebertoxisch, chronisch toxisch	Ausbau, Beschichtung, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich, Anzeige bei der zuständigen Berufsgenossenschaft
PAK	Dichtungsbahnen, Dachbahnen, Bodenbeläge, Klebstoffe, Anstriche	krebserzeugend, immuntoxisch, lebertoxisch, erbgutverändernd, schleimhautreizend	Ausbau, Beschichtung, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich, Anzeige bei der zuständigen Berufsgenossenschaft
Quecksilber	Thermometer, Leuchtstofflampen, Energiesparlampen	neurotoxisch, nierenschädigend, bioakkumulierend, hohe Toxizität	Ausbau, Beschichtung, Sachkunde gemäß DGUV Regel 101-004 erforderlich
Schimmelpilze	In Innenräumen bei Feuchte- und Wasserschäden	Allergenes Potenzial, infektiös, toxigenes Potenzial	Desinfektion, durch Fachfirmen, Rückbau und Austausch

Neben den Emissionen aus Baustoffen und Ausstattungsmaterialien kann die Innenraumluft an Büroarbeitsplätzen durch eine durchschnittlich höhere Anzahl an elektronischen Geräten, wie Computer, Bildschirme, Drucker oder Kopierer zusätzlich mit Schadstoffen belastet werden. Nicht zu unterschätzen sind zudem Schadstoffemissionen durch Desinfektions- und Reinigungsmittel, die in Arbeitsumgebungen regelmäßig angewendet werden. Etwas mehr in den Fokus der Betrachtung sind diese Aspekte im Zuge von Gebäude-Zertifizierungsprozessen gerückt, bei denen auch der Gebäudebetrieb analysiert wird.

Darüber hinaus gehört elektromagnetische Strahlung der vorhandenen Geräte, ergonomische Probleme sowie psychische Belastung zu weiteren Risikofaktoren an Arbeitsplätzen.

Wesentliche Anforderungen zur Gestaltung von Büroräumen sind vor allem in der Arbeitsstättenrichtlinie, den technische Regeln für Arbeitsstätten, der Bildschirmarbeitsverordnung und der Bildschirmrichtlinie zu finden.

Tabelle A2.7: Mögliche Expositionen und Schadstoffquellen an Büroarbeitsplätzen (NOLD & BOCHMANN 2006; 200)

Exposition	Übliche Quellen
Ammoniak	Putzmittel
Kohlendioxid	Verbrauchte Luft, Verbrennungsprodukte
Kohlenmonoxid	Zigarettenrauch, Verbrennungsprodukte, Autoabgase durch offene Fenster
Formaldehyd	Zigarettenrauch, Schaumisoliermaterial, Spanplatten, Kleber, Holzschutzmittel
Stickoxide	Zigarettenrauch, Verbrennungsprodukte, Autoabgase, Heizofen
Ozon	Kopierer
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	Tabakrauch, Farben
Polychlorierte Dibenzodioxine/ Dibenzofurane (PCDD/ F)	Holzschutzmittel
Polychlorierte Biphenyle (PCB)	defekte, elektronische Bauteile, Farbanstrich
Flüchtige org. Verbindungen (VOC)	Farben für Fenster, Türen, Heizkörper
Pestizide	Zimmerpflanzen
Lösungsmittel	Farben, Kleber, Putzmittel, Teppiche, Tapeten
Tabakrauch	Zigaretten, Zigarren
Gerüche	Verschiedene Verbindungen
Autoabgase	Hohes Verkehrsaufkommen vor dem Gebäude
Asbest	Isolierung, Decke
Stäube	Hausstaub, Tonerstaub, künstliche Mineralfasern
Ionisierende Strahlung	Ausdünstungen aus dem Boden, Undichtigkeiten in Kellerwänden, die das Eindringen von Radon ermöglicht
Mikroorganismen	Belüftungsanlage, Klimaanlage, alte Teppiche, Bücher
Mikroorganismen	Luftbefeuchter, Wasserversorgung
Ausscheidungen von Tieren	Kot von Hausstaubmilben



### 3.2 Lüftung in Nicht-Wohngebäuden

Weder für Wohn- noch für Nichtwohngebäude ist der Einbau von mechanischen Lüftungsanlagen verpflichtend. Grundsätzlich kann mit natürlicher Lüftung eine ausreichende Belüftung sichergestellt werden, vorausgesetzt die Räume verfügen über die Möglichkeiten der Fensterlüftung. Anderenfalls sind Lüftungstechnische Maßnahmen unerlässlich. Die Gründe für unzureichende natürliche Lüftung sind oftmals Abmessungen der Räume, besondere Nutzung oder die Lage, häufig aber einfach mangelndes Nutzerengagements.

Die ab 2017 geltende DIN EN 16798 „Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden“ sowie „Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik“ ersetzt die bisherigen Normen DIN EN 13779 und DIN EN 15251. Die DIN EN 16798 dient zur Auslegung, Ausführung, dem Betrieb und Wartung von raumluftechnischen Anlagen bei Nichtwohngebäuden. Darüber hinaus beinhaltet die Norm Werte für das Innenraumklima (wie z. B. Temperatur, Lüftungsrate, Beleuchtungsstärke).

Für die Auslegung der Lüftungsrate eines Raumes werden kritische oder maßgebende Verunreinigungen sowie Stofflasten betrachtet. Dabei sollen die angegebenen Werte bzgl. CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft nicht überschritten werden. Die Kategorie II – normales Maß an Erwartungen entspricht dabei den gängigen Verhältnissen.

Tabelle A2.8: Standardauslegungswerte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration oberhalb der Konzentration in Außenluft unter Annahme einer Standard-CO<sub>2</sub>-Emission von 20 l/(h je Person) (DIN 16798-1; 51)

Kategorie	Entsprechende CO <sub>2</sub> -Konzentration oberhalb der Konzentration in Außenluft für unangepasste Personen
I Hohes Maß an Erwartungen; auch empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten, z. B. mit Behinderungen, kranke Personen, sehr kleine Kinder und ältere Personen, zur Erhöhung der Zugänglichkeit	550 ppm
II Normales Maß an Erwartungen	800 ppm
III Annehmbares, moderates Maß an Erwartungen	1.350 ppm
IV Geringes Maß an Erwartungen. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden	1.350 ppm

Bezüglich der Gesamt-Lüftungsrate soll diese 4 l/s je Person nicht unterschreiten. Bei einem 10 m<sup>2</sup> großen Raum entspricht dies einer Luftwechselrate von 1,2 h<sup>-1</sup>.

Tabelle A2.9: Auslegungs-Lüftungsraten zur Verdünnung von Emissionen in unterschiedlichen Gebäuden (DIN 16798-1; 49)

Kategorie	Sehr schadstoffarmes Gebäude l/(sm <sup>2</sup> )	Schadstoffarmes Gebäude l/(sm <sup>2</sup> )	Nicht schadstoffarmes Gebäude l/(sm <sup>2</sup> )
I	0,5	1,0	2,0
II	0,35	0,7	1,4
III	0,2	0,4	0,8
IV	0,15	0,3	0,6
Mindestwert der Gesamt-Lüftungsrate für Gesundheitszwecke			4 l/s je Person

Das Prinzip der natürlichen Lüftung in Nichtwohngebäuden wird in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR 3.6 2012) genauer erläutert. Zur natürlichen Lüftung gehören Fensterlüftung, Schachtlüftung, Dachaufsatzlüftung sowie Lüftung durch sonstige Lüftungsöffnung. Natürliche Lüftung hat vor allem in Verwaltungs- und Büroräumen eine hohe Akzeptanz, da die Öffnung der Fenster meist von den Beschäftigten selbst bestimmt werden kann.

Die ASR unterscheidet zwei Systeme der natürlichen Lüftung: die einseitige Lüftung und Querlüftung. Eine ausreichende freie Lüftung in Arbeitsräumen ist nur dann gewährleistet, wenn die erforderlichen Lüftungsquerschnitte und die maximal zulässigen Raumtiefen eingehalten werden. Berechnungsbeispiele der erforderlichen Lüftungsquerschnitte befinden sich im Anhang der ASR.

Mit zunehmenden Raumtiefen ist die Sicherung des Mindestluftwechsels bei einseitiger Fensteröffnung begrenzt möglich. Bei einer Raumhöhe von bis zu 4 m sollte die Raumtiefe nicht mehr als das 2,5-fach der Raumhöhe betragen. Bei Querlüftung darf die Raumtiefe dagegen nicht mehr als das 5-fache überschreiten.

Tabelle A2.10: Mindestöffnungsfläche für kontinuierliche Lüftung und für Stoßlüftung (ASR 3.6 2012; 8)

System	Maximal zulässige Raumtiefe bezogen auf die lichte Raumhöhe (h) [m]	Öffnungsfläche zur Sicherung des Mindestluftwechsels	
		für kontinuierliche Lüftung [m <sup>2</sup> /anwesende Person]	für Stoßlüftung [m <sup>2</sup> /10 m <sup>2</sup> Grundfläche]
I einseitige Lüftung	Raumtiefe = 2,5 x h (bei h > 4 m: max. Raumtiefe = 10 m) (angenommene Luftgeschwindigkeit im Querschnitt = 0,08 m/s)	0,35	1,05
II Querlüftung	Raumtiefe = 5,0 x h (bei h > 4 m: max. Raumtiefe = 20 m) (angenommene Luftgeschwindigkeit im Querschnitt = 0,14 m/s)	0,20	0,60

Unter Stoßlüftung versteht man einen kurzzeitigen (ca. 3 bis 10 Minuten), intensiven Luftaustausch. Sie sollte in regelmäßigen Abständen und nach Bedarf ausgeführt werden. Die ASR empfiehlt als Anhaltswerte 60 min für Büroräume und 20 min für Besprechungsräume. Zudem hängt die Dauer der Lüftung von den Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenraum sowie der Windgeschwindigkeit. Als Orientierungswerte nennt die Arbeitsstättenrichtlinie bis zu 10 min im Sommer, 5 min im Frühling/Herbst und 3 min im Winter.

### 3.3 Zimmerpflanzen

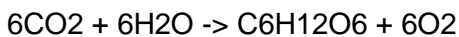
Das Verständnis über physiologische Prozesse von Pflanzen ermöglicht eine bessere Deutung der Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft. Daher erfolgt nachfolgend eine kurze Einführung in den Ablauf der Photosynthese sowie der Einflussfaktoren auf das Photosynthesevermögen.

### 3.4 Pflanzenphysiologie

Die Blätter einer Pflanze dienen hauptsächlich zur **Photosynthese**, einem grundlegenden physiologischen Prozess zur Erzeugung von energiereichen Biomolekülen mithilfe von Strahlungsenergie. Bei der Photosynthese wird Wasser und Kohlenstoffdioxid in Glucose und Sauerstoff umgewandelt. Die Photosynthese ist eine Form der sog. autotrophen Assimilation, bei der sowohl Pflanzen als auch einige Bakterienarten aus körperfremden Stoffen körpereigene Stoffe aufbauen.

Reaktionsgleichung der Photosynthese:

Kohlenstoffdioxid + Wasser -> Glucose + Sauerstoff



Der Stoffaustausch von Pflanzen erfolgt durch die Aufnahme von Kohlenstoffdioxid über die Stomata (Spaltöffnungen an den Blattunterseiten) sowie die Aufnahme von Wasser über Wurzeln. Bedingung für den Ablauf der Photosynthese ist das Vorhandensein von Chlorophyll und Lichtenergie (vorrangig Strahlungsenergie der Sonne). (vgl. Pflanzenforschung o.J., a)

Das Chlorophyll befindet sich in allen grünen Pflanzenteilen, jedoch findet die Photosynthese hauptsächlich in den Blättern (Phyllom) einer Pflanze statt. Diese sind mehrschichtig aufgebaut. Auf den Blattoberseiten befindet sich die Kutikula (1) – eine dünne wasserundurchlässige, hydrophobe Wachsschicht. Sie schützt vor Verdunstung. Die obere Epidermis (2) verleiht durch Cellulose-Einlagerungen Stabilität. Das Palisadengewebe (3) beinhaltet 80% der Chloroplasten, in denen sich der natürliche Farbstoff Chlorophyll befindet. Es wird daher auch als Assimilationsgewebe bezeichnet. Während der Photosynthese werden in den Chloroplasten Glucose und Sauerstoff gebildet. Glucose dient zudem als Grundlage für die Bildung weiterer organischer Stoffe in den Pflanzenzellen.

Das Schwammgewebe (4) hat einen lockeren Aufbau und steuert den Gasaustausch der Pflanze. Dabei diffundiert das Kohlendioxid ins Blatt und der Sauerstoff heraus. Zudem verdunstet Wasser durch diese Zellen. Der resultierende Zellinnendruck ermöglicht, Wasser und Nährstoffe von der Wurzel in der ganzen Pflanze zu verteilen. (vgl. The Green Channel 2018)

Die Zwischenräume des Schwammgewebes werden als Interzellularen bezeichnet. Da im Blatt dauernd Kohlenstoffdioxid gebunden wird, ist die Konzentration an  $\text{CO}_2$  in den Interzellularen geringer als in der Atmosphäre und es strömt weiteres  $\text{CO}_2$  hinein. Andererseits wird durch Photosynthese Sauerstoff freigesetzt, so dass die Konzentration in den Interzellularen höher als in der Außenluft ist und der Sauerstoff nach außen strömt.

Ohne die Einwirkung der Strahlungsenergie, also vor allem nachts, wird der Prozess umgekehrt. Es findet dann keine Photosynthese mehr statt. Durch die fortwährende Dunkelatmung der Blätter strömt allerdings  $\text{CO}_2$  heraus und Sauerstoff diffundiert hinein. In der Regel wird jedoch tagsüber mehr Sauerstoff produziert als nachts verbraucht wird, sowie mehr  $\text{CO}_2$  verbraucht als produziert. (Pflanzenforschung o.J., a)

Die untere Epidermis (5) beinhaltet die Stomata (6), durch die der Gasaustausch möglich wird. Die Schließzellen (7) verfügen als einzige Zellen der Epidermis über Chlorophyll und können sich somit öffnen oder schließen. Bei intensiver Strahlung schließen sich die Zellen, um die Pflanze vor Verdunstung zu schützen. Bei geringerer Strahlung öffnen sich die Zellen und die Photosynthese findet statt. In den Leitbündeln (8), auch Blattadern genannt, befindet sich das Xylem (9), welches für den Transport von Wasser sorgt und das Phloem (10), welches Nährstoffe transportiert. (vgl. The Green Channel 2018)

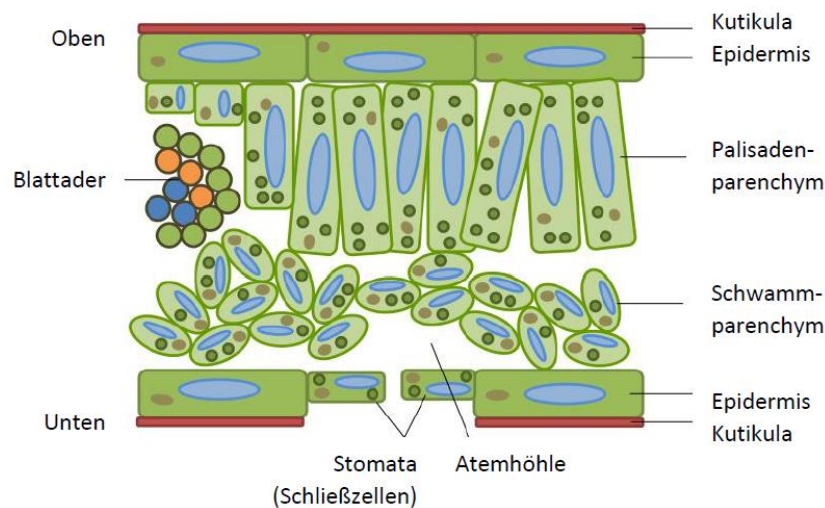


Abbildung A2.60: Querschnitt eines Blattes (DAVENPORT 2015)

Für eine optimale Photosyntheseleistung passen sich Pflanzen ihrem Standort an. So besitzen mediterrane Pflanzen oft eine dickere Kutikula, um sich vor der intensiven Sonneneinstrahlung zu schützen. Sonnenblätter sind häufig kleiner, um die Verdunstung gering zu halten. Sie besitzen ein doppeltes Palisadengewebe für mehr Fläche für die Photosynthese. Dagegen sind Schattenblätter in der Regel größer und besitzen nur ein einfaches Palisadengewebe, da aufgrund der Blattgröße ausreichend Fläche für Photosynthese vorhanden ist.

Aufgrund unterschiedlicher Standort- und Klimabedingungen (Trockenheit, hohe Temperaturen etc.) entwickelten sich zudem drei Typen von Pflanzen: C3-, C4- und CAM-Pflanzen. Die unterschiedliche Anpassung an die Umwelt ermöglicht ihnen eine uneingeschränkte Photosyntheseleistung. Die meisten höheren Pflanzenarten gehören zu den C3-Pflanzen. Die Photosynthese wird, wie bereits im oberen Textabschnitt beschrieben, bei normalen Temperatur- und Lichtverhältnissen betrieben. Bei zu hohen Temperaturen und Trockenheit schließen sich die Stomata, wodurch die Photosyntheseleistung sinkt. Da bei der Fixierung des  $\text{CO}_2$  als erstes stabiles Produkt ein Molekül mit drei Kohlenstoffatomen entsteht, wird dieser Prozess als C3-Photosynthese bezeichnet.

Pflanzen, die an sehr trockenen Standorten wachsen, betreiben dagegen die C4- oder CAM-Photosynthese, bei der eine andere Art der  $\text{CO}_2$ -Assimilation stattfindet. Im Gegensatz zu C3-Pflanzen können C4-Pflanzen auch bei geschlossenen Spaltöffnungen weiterhin Photosynthese betreiben. Da die C4-Photosynthese in zwei voneinander getrennten Zelltypen stattfindet, sind bereits sehr niedrige  $\text{CO}_2$ -Mengen für den Prozess ausreichend.

Bei CAM-Pflanzen sind die Abläufe der Photosynthese zeitlich voneinander getrennt. Um die Pflanze vor übermäßigem Wasserverlust zu schützen, öffnen CAM-Pflanzen ihre Stomata nur nachts, um  $\text{CO}_2$  aufzunehmen und es zu speichern. (vgl. Pflanzenforschung o.J., a).

Atmungsaktivität und Photosynthesevermögen einer Pflanze sind keine konstanten Größen. Vielmehr sind sie von mehreren verschiedenen Faktoren abhängig, die zum Teil auch im Verhältnis miteinander stehen.

Zur Beschreibung des Wachstumsvermögens von Pflanzen wurde im Jahr 1855 u.a. das sog. Minimumgesetz formuliert, welches besagt, dass das Wachstum der Pflanzen durch den im Verhältnis am wenigsten vorhandenen Faktor (Licht, Wasser, Nährstoffe, Temperatur) begrenzt wird. Mittlerweile wurde das Minimumgesetz durch das Optimumgesetz ergänzt, wonach die Produktivität sowohl bei Unter- als auch bei Überschreiten eines optimalen Nährstoffangebots abnimmt (vgl. Martin

et al. 2001). Ungünstige Standortbedingungen können zu Schäden, Krankheiten oder zum Absterben der Pflanze führen. Dabei hat jede Pflanze arttypische Bedürfnisse, die beachtet werden müssen.

Der Entwicklungszustand hat eine erhebliche Auswirkung auf den Gasaustausch der Pflanze. Besonders bei jüngeren Pflanzen, beim Laubaustrieb, in heranwachsenden Früchten, bei Keimpflanzen und in Wurzelspitzen beträgt der Gasaustausch das Drei- bis Zehnfache der normalen Aktivitäten. Älteres, ausgereiftes Pflanzengewebe weist hingegen eine niedrigere Atmungsaktivität auf. Bei Zimmerpflanzen ist durch die fortlaufende Entwicklung neuer Blätter jedoch eine konstante CO<sub>2</sub>-Aufnahme zu erwarten (vgl. Lacher 1991; 83).

Der Öffnungszustand der Stomata ist eine wichtige, oft unterschätzte Einflussgröße der Photosyntheseintensität. Pflanzen regulieren über ihre Spaltöffnungen nicht nur den Gasaustausch (Kohlendioxid/Sauerstoff), sondern auch die Transpiration (Wasserhaushalt). In der Regel öffnen sich die Spaltöffnungen mit zunehmender Lichtintensität. Bei zu hohen Temperaturen, die vor allem mittags an Sommertagen auftreten können, schließen sich die Spaltöffnungen allerdings wieder und werden erst am späten Nachmittag wieder geöffnet, um die Pflanze vor einem zu hohen Wasserverlust und Austrocknung zu schützen. Durch das Schließen der Spaltöffnungen kann weniger CO<sub>2</sub> aufgenommen werden und die Photosyntheseleistung sinkt. Dieses Phänomen wird als Mittagsdepression bezeichnet.

Hierbei muss jedoch zwischen Licht- und Schattenpflanzen unterschieden werden. Lichtpflanzen benötigen nicht nur höhere Lichtintensitätsraten, sondern können diese auch besser ausnutzen. Schattenpflanzen dagegen erreichen den sog. Lichtkompensationspunkt bei deutlich niedrigeren Lichtintensitäten. (vgl. Pflanzenforschung o.J., b)

Der Chlorophyllgehalt der Blätter ist bei jeder Pflanze unterschiedlich. Grundsätzlich verfügen Pflanzen mit panaschierten Blättern (mit gelben und weißen Anteilen) weniger Chlorophyll als vollständig grüne Blätter und besitzen somit ein geringeres Photosynthesevermögen. In der Regel benötigen solche Pflanzen dadurch mehr Licht.

Die ausreichende Versorgung mit natürlichem Tageslicht bestimmt die Entfaltung und physiologische Leistung von Zimmerpflanzen. Die Ansprüche variieren dabei im Jahreszeitenwechsel. Andauernder Lichtmangel kann jedoch zu Schäden führen. So werfen einige Zimmerpflanzen ihre Blätter ab, um den Energieverbrauch zu senken. Neue Blätter bleiben dabei deutlich kleiner. Pflanzen mit panaschierten Blättern vergrünen dagegen, um mehr Licht auffangen zu können. Auch Blattstrukturen, wie Löcher oder Ausbuchtungen, bilden sich zurück.

Hinsichtlich des Lichtbedarfs werden Pflanzen in Kurztag- und Langtagpflanzen eingeteilt. Bei Kurztagpflanzen erfolgt die Blütenbildung bzw. nur dann beschleunigt wird, wenn die Beleuchtungsphase deutlich weniger andauert als die Dunkelphase (z.B. aufgeteilt in 8 und 16 Stunden). Bei Langtagpflanzen muss dagegen die Beleuchtungsdauer die arttypische kritische Tageslänge (meist 12 Stunden) überschreiten, damit die Blütenbildung beginnt. Daneben gibt es auch tagneutrale Pflanzen, die sowohl bei längeren als auch kürzeren Beleuchtungsphasen blühen können. Die Fähigkeit von Pflanzen und Tieren, die Tageslängen und somit auch die Jahreszeit bestimmen zu können, wird Fotoperiodismus genannt (vgl. Brechner et al. 2001). Zudem verfügen viele Zimmerpflanzen über einen jahreszeitlichen Vegetationszyklus, bei dem winterliche kurze Lichtphasen gut vertragen werden.

Als Anhaltswert für die benötigte Lichtmenge von Zimmerpflanzen dient die Angabe der Beleuchtungsstärke in Lux [lx]. Sie gibt an, welcher Lichtstrom (gemessen in Lumen [lm]) auf eine Flächeneinheit (gemessen in Quadratmetern [m<sup>2</sup>]) fällt. Die Lichtintensität an Sommertagen beträgt bei klarem Himmel ca. 100.000 Lux, bei bedecktem Himmel ca. 20.000. An Wintertagen beträgt sie

dagegen bei klarem Himmel nur noch 20.000 Lux und bei bedecktem Himmel ca. 6.000 Lux (vgl. Step Systems GmbH 2005).

Darüber hinaus muss bedacht werden, dass die Lichtintensität in Innenräumen (hinter Glasscheiben) in etwa halb so hoch ist wie im Außenbereich. Besonders mehrfachverglaste Fensterscheiben filtern das für Zimmerpflanzen benötigte Tageslicht gut. Weitere Tageslicht-verringemde Faktoren sind beispielsweise Gardinen vor dem Fenster, verschmutzte Glasscheiben, Beschattung von außen oder die Entfernung von Fensterscheiben. So beträgt die Lichtintensität in 1 m Raumtiefe nur noch ca. 20 % und in 2 m Tiefe 10 % (vgl. Kreuzer 2018).

Tabelle A2.11: Pflanzenwachstum in Abhängigkeit von der Lichtintensität(vgl. Step Systems GmbH 2005; 1)

Lichtintensität	Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum
< 300 Lux	Wachstumsstillstand, Pflanzen verkümmern
300 - 1.000 Lux	kein Zuwachs der Pflanzen
1.000 - 3.000 Lux	Pflanzen wachsen sehr langsam
3.000 - 10.000 Lux	Pflanzen wachsen proportional mit steigender Lux-Zahl
10.000 - 12.000 Lux	Optimum für die meisten Pflanzen
>12.000 Lux	wird die Lichtintensität von den Pflanzen nicht mehr ausgenutzt, weil meistens die Wärme den Assimilationsvorgang stört.

Tabelle A2.12: Beispiele für den Lichtbedarf von Zimmerpflanzen (vgl. Step Systems GmbH 2005; 2 f.)

Pflanze	Mindestluxzahl [lux]
<i>Anthurium</i> - Flamingoblatt	1.2000
<i>Chamaedorea elegans</i> - Bergpalme	600
<i>Chlorophytum comosum</i> - Grünstilbe	600
<i>Dieffenbachia</i> - Dieffenbachie	600 – 1.000
<i>Dracaena marginata</i> - Drachenbaum	500 - 600
<i>Ficus benjamina</i> - Birkenfeige	1.000
<i>Monstera deliciosa</i> - Fensterblatt	300
<i>Sansevieria trifasciata</i> - Bogenhanf	300
<i>Schefflera arboricola</i> - Schefflera	800
<i>Spathiphyllum wallisii</i> - Einblatt	400

In Innenräumen, in denen das natürliche Tageslicht nicht ausreicht, kann das künstliche Licht den Lichtbedarf von Pflanzen ergänzen oder sogar ganz ersetzen. Wichtig dabei ist die spektrale Zusammensetzung des Lichts.

Die Biosphäre empfängt insgesamt Sonnenstrahlung aus dem Wellenlängenbereich von 290 nm bis 3.000 nm. Davon entfallen ca. 45-50% der zugestellten Sonnenenergie auf den Wellenlängenbereich von 380-710 nm (vielfach auch als 400-700 nm angegeben). Dieser kann von Pflanzen photosynthetisch genutzt werden (vgl. Lacher 1991; 37). Für die Photosynthese ist besonders Licht roter Wellenlängen (660 nm), das zur Blüte anregt, und blauer Wellenlängen (470 nm), das zum Wachstum anregt, wichtig. Grünes Licht (520-565 nm) und dunkelrotes Licht (um 730 nm) wird reflektiert, so dass Blätter grün erscheinen. Das dunkelrote Licht wird dabei vom dunkelgrünen überstrahlt (vgl. Pflanzenforschung o.J., c).

Zu wenig Licht in Kombination mit zu vielen Nährstoffen und Wasser führt zum sog. Vergeilen (Etiolieren). Neue Triebe werden dann lang und dünn und können sich selbst nicht mehr tragen, die Blattspreiten bleiben meist rudimentär. In Extremfällen unterbleibt die Bildung von Chlorophyll. Solche Abweichungen, in Dunkelheit gewachsener Pflanzen, werden auch Etiolement genannt. Der

Nutzen möglichst lange Triebe hervorzubringen liegt darin, die Assimilationsorgane wieder ans Licht zu bringen. Beobachten lässt sich dieses Phänomen beispielsweise bei der Kartoffel. Während im Dunkeln aus der Knolle ein farbloser Spross mit rückgebildeten Blättern (Etiollement) wächst, bildet sich die „normale“ grüne Pflanze nur bei ausreichender Lichteinwirkung (vgl. Sauermost et al. 1999, a).

Die Temperatur beeinflusst die Stoffwechselfvorgänge über die Reaktionskinetik chemischer Prozesse. Die sog. Reaktionsgeschwindigkeits-Temperatur-Regel (RGT-Regel) besagt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur exponentiell zunimmt. Im Hinblick auf die Fixierung und Reduktion des CO<sub>2</sub> erfolgt die Aufnahme in niedrigem Temperaturbereich schneller bei Erwärmung, bis das Optimum erreicht ist. Bei hohen Temperaturen kommen die photosynthetische Leistung und damit die CO<sub>2</sub>-Aufnahme zum völligen Erliegen. Bei anschließend günstigeren Bedingungen erholen sich die Pflanzen wieder. Das Temperaturoptimum der C3-Pflanzen befindet sich allgemein zwischen 20-30°C. Die Kältengrenze der CO<sub>2</sub>-Aufnahme liegt dabei bei -2-0°C (vgl. Larcher 1991; 95 ff.).

In Bezug auf die Temperatur in Innenräumen sollten die spezifischen Bedürfnisse der einzelnen Pflanzen beachtet werden. Einige Pflanzen vertragen beispielsweise keinen Zug, andere keine niedrige Temperatur, die z.B. nachts auftreten könnte. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass eine dauerhaft erhöhte Temperatur im Wurzelbereich aufgrund von Fußbodenheizung zu einer Wachstumsaufforderung führt. In Verbindung mit geringerer Lichtintensität bzw. kürzeren Lichtphasen in den Wintermonaten kann dies zum Etiolieren führen.

Das CO<sub>2</sub>-Angebot ist ein weiterer Faktor, der das Photosynthesevermögen von Pflanzen bestimmt. Er hängt mit der Wasserversorgung der Pflanze zusammen, denn bei Wassermangel sinkt die Photosyntheseaktivität erheblich durch die Abnahme des Turgor-Drucks (vgl. Larcher 1991; 101).

Mit zunehmender CO<sub>2</sub>-Konzentration und ausreichender Wasserversorgung steigt die Photosyntheseleistung. Ab einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 600 ppm erhöht sich das Wachstum der Pflanzen (und damit die Photosyntheserate) um etwa 15-20 %. Bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 700 ppm erhöht sich die Wuchsgeschwindigkeit um 40 %. Bei 1.000 ppm können es sogar 50 % werden. Eine CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen 1.000 – 5.000 ppm bringt keinen Mehrwert, schadet aber auch nicht. Im Umkehrschluss verlangsamt eine geringen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 150 ppm das Wachstum von Pflanzen. (vgl. Possel 2018)

### **3.5 Raumlufthereinigende Pflanzen**

Im Hinblick auf die luftreinigenden Eigenschaften von Zimmerpflanzen wurden in den vergangenen Jahren mehrerer Studien erstellt. Zu den Bekanntesten zählen die NASA Clean Air Study sowie die Untersuchungen von Bill und John Wolverton. Die Studien bezogen sich dabei auf die Entfernung von Chemikalien wie Benzol, Xylol und Formaldehyd aus der Raumlufte und geben keine weiteren Aufschlüsse über die CO<sub>2</sub>-Bindungskapazität.

Im Jahr 1989 veröffentlichte die amerikanische Raumfahrtbehörde NASA die "Clean Air Study", welche bis heute gültige Erkenntnisse über raumlufthereinigende Pflanzen beinhaltet. Anlass für die Studie waren die Veränderungen, die durch die Energiekrise in den späten 1970er Jahren hervorgerufen wurden. Sie führten zu verstärkten Maßnahmen zur Einsparung von Energie, wie der „superinsulation“ (vgl. NASA 1989; 1) – einem hohen Isolations- und Luftdichtheitsgrad der Gebäude. Nach Sanierungs- und Umbaumaßnahmen führte ein längerer Aufenthalt in den Gebäuden bei vielen Personen zu unspezifischen Gesundheitsbeschwerden, die auf luftdichte Gebäudehüllen und damit eine geringe Luftwechselrate sowie auf Schadstoff-emittierende Materialien und Inneneinrichtungsgegenstände zurückzuführen waren - dem Sick- Building-Syndrom. In einer von DR. TONY PICKERING durchgeführten Studie (vgl. NASA 1989; 1) konnte belegt werden, dass besonders in

Gebäuden mit RLT-Anlagen verstärkt Symptome des SBS auftraten. Minimale Symptome traten dagegen in Gebäuden auf, die natürlich gelüftet wurden und ein hohes Aufkommen von Mikroorganismen aufwiesen.

Die Clean Air Study wurde in Zusammenarbeit mit ALCA (Associated Landscape Contractors of America) durchgeführt und dauerte insgesamt 2 Jahre. Ziel der Studie war die Untersuchung der luftreinigenden Eigenschaften von Zimmerpflanzen zur Verbesserung der Raumluftqualität. Die Untersuchungen erfolgten in Plexiglas-Kammern und umfassten eine Periode von 24 Stunden. Die Entfernung folgender Chemikalien wurde untersucht:

- Benzol – farblose Flüssigkeit, mit charakteristischem Geruch, gehört zu den aromatischen Kohlenwasserstoffen. Enthalten in Lösungsmitteln, Abgasen, Tinten, Plastik, Gummi, Zigarettenrauch. Verursacht Irritationen der Haut und Augen, Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit, Leber- und Nierenschäden, wirkt mutagen und embryotoxisch und kanzerogen.
- Formaldehyd – farbloses Gas, Enthalten in Holzwerkstoffen, Desinfektionsmitteln, Kosmetika, Textilien, Farben, thermoplastischen Kunststoffen, Zigarettenrauch. Verursacht Allergien, Reizung der Schleimhäute, wirkt kanzerogen.
- Trichlorethylen – farblose nicht brennbare Flüssigkeit, Chloroform-Geruch. Enthalten in Lösemittel, Reinigungs- und Entfettungsmitteln. Verursacht Reizung der Atemwege, Rauschzustand, Leber- und Nierenschäden, Schwindel, Kopfschmerzen, wirkt kanzerogen.

Zusätzlich dazu wurden die luftreinigenden Eigenschaften der Blumenerde und der darin enthaltenen Bodenorganismen (vor allem Bakterien) ohne Pflanzen geprüft. Es konnte festgestellt werden, dass der Wurzelbereich der effizienteste Bereich zur Entfernung von Chemikalien aus der Luft ist (vgl. NASA 1989; 18). Aus diesem Grund sollte der Bereich freigehalten werden (Bedeckung der Blumenerde durch Blätter sollte verhindert werden).

Weitere Untersuchungen wurden in den 1990er Jahren von den US-amerikanischen Wissenschaftlern Bill und John Wolverton vorgenommen, die bereits bei der NASA Clean Air Study mitwirkten. In einer Studie aus dem Jahr 1993 „Plant and Soil Microorganisms: Removal of Formaldehyde, Xylene and Ammonia from the Indoor Environment“ untersuchten sie die Fähigkeit von Zimmerpflanzen zur Entfernung von Chemikalien aus der Raumluft. Die Pflanzen, welche die größte Menge an Chemikalien entfernen konnten, sind in Tabelle A2.13 zusammengestellt. Zusätzlich zu Formaldehyd untersuchte Wolverton die Entfernung von Ammoniak, Xylol und Toluol.

- Xylol und Toluol – farblose organische Verbindungen, charakteristischer Geruch, gehören zu aromatischen Kohlenwasserstoffen, ähnlich wie Benzol. Enthalten in Lösungsmitteln, Lacken, Farben, Kunststoffen, Kraftstoffen. Verursachen Kopfschmerzen, Schwindel, Atemnot, kognitive Störungen, wirken kanzerogen.
- Ammoniak – farbloses Gas, stechender Geruch. Quellen: Düngemittel, Tierhaltung, Verkehr. Verursacht Reizung der Schleimhäute und Atemwege, chronische Atemwegserkrankungen.



Tabelle A2.13: Untersuchungen zur Entfernung von Ammoniak, Xylol und Toluol aus der Luft durch Zimmerpflanzen (Wolverton & Wolverton 1993; 13 f.)

Platz	Formaldehyd [µg]		Xylol [µg]		Ammoniak [µg]	
1	<i>Nephrolepis exaltata</i> 'Bostoniensis'	1863	<i>Phoenix roebelenii</i>	610	<i>Rhapis excelsa</i>	7,356
2	<i>Chrysanthemum morifolium</i>	1450	<i>Dieffenbachia camille</i>	341	<i>Homalomena</i> sp.	5,208
3	<i>Phoenix roebelenii</i>	1385	<i>Dracaena marginata</i>	338	<i>Liriope spicata</i>	4,308
4	<i>Dracaena deremensis</i> 'Janet Craig'	1361	<i>Dieffenbachia maculata</i>	325	<i>Anthurium andraeanum</i>	4,119
5	<i>Nephrolepis obliterated</i>	1328	<i>Homalomena</i> sp.	325	<i>Chrysanthemum morifolium</i>	3,641
6	<i>Hedra helix</i>	1120	<i>Nephrolepis obliterated</i>	323	<i>Calathea vitata</i>	3,100
7	<i>Ficus benjamina</i>	940	<i>Dracaena deremensis</i> 'Warneckii'	295	<i>Tulip</i> , Yellow Present'	2,815
8	<i>Spathiphyllum</i> ssp. <i>Clevelandii</i>	939	<i>Anthurium andraeanum</i>	276	<i>Chamaedora elegans</i>	2,453
9	<i>Dracaena fragrans</i>	938	<i>Dracaena fragrans</i>	274	<i>Ficus benjamina</i>	1,480
10	<i>Rhapis excelsa</i>	876	<i>Ficus benjamina</i>	271	<i>Spathiphyllum</i> ssp. <i>Clevelandii</i>	1,269

Zudem untersuchten Sie das Substrat der Zimmerpflanzen und stellten fest, dass sowohl die Biomasse der Zimmerpflanzen als auch die im Substrat enthaltenen Mikroorganismen Chemikalien aus der Luft entfernen. Besonders wichtig ist, dass das Substrat nicht selbst von Schimmelpilzen befallen ist, weshalb unbedingt auf maßvolles Wässern zu achten ist. Eine zusätzliche Kiesschicht im Blumentopf verhindert zudem Staunässe. In diesem Zusammenhang konnte durch die Untersuchungen von Bill und John Wolverton belegt werden, dass Zimmerpflanzen insgesamt die Belastung der Luft mit Mikroben um 50-60% reduzieren können (vgl. Wolverton & Wolverton 1996; 99-105).

In einer im Jahr 1994 durchgeführten Studie wurde die Abbaufähigkeit von Formaldehyd aus der Luft durch Grünlilien (*Chlorophytum Comosum*) untersucht (vgl. Giese et al. 1994; 1301 ff.). Das Formaldehyd wurde sowohl von den Blättern als auch von den natürlich vorkommenden Mikroben in Wurzelnähe in Aminosäuren und Glucose umgewandelt. Bei einer höheren Schadstoff-Exposition konnte zudem beobachtet werden, dass auch die Abbaurate der Mikroben gestiegen ist. Grund dafür war die Bildung neuer, gegen die Schadstoffe resistenter Kolonien.

Pflanzen mit einer hohen Transpirationsrate erweisen sich als am besten geeignet zur Entfernung von Schadstoffen aus der Luft, da sie gleichzeitig eine hohe Sauerstoffzufuhr zu den Wurzeln aufweisen. Dadurch gelangen gleichzeitig auch Schadstoffe in den Wurzelbereich der Pflanze. Die Transpirationsrate der Pflanzen korreliert wiederum mit der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte.

In seinem im Jahr 1997 erschienenem Buch "How to Grow Fresh Air – 50 Houseplants That Purify Your Home or Office" erstellte Bill Wolverton anschließend eine Liste mit 50 Zimmerpflanzen, die nach den Kriterien Entfernung von Chemikalien aus der Luft, Pflegeaufwand, Resistenz gegenüber

Insektenbefall und Transpirationsrate bewertet wurden. Zu den hiernach bestbewerteten Zimmerpflanzen gehören:

- 1) *Dypsis lutescens* – Goldfruchtpalme
- 2) *Rhapis excelsa* – Steckenpalme
- 3) *Chamaedorea seifrizii* – Bambuspalme
- 4) *Ficus robusta* – Gummibaum
- 5) *Dracaena deremensis* 'Janet Craig' – Drachenbaum
- 6) *Hedera helix* – Efeu
- 7) *Phoenix roebelenii* – Zwergdattelpalme
- 8) *Ficus benjamini* 'Alii' - Birkenfeige
- 9) *Nephrolepis exaltata* 'Bostoniensis' – Schwertfarn
- 10) *Spathiphyllum* sp. - Einblatt
- 11) *Dracaena fragrans* 'Massangeana' - Drachenbaum
- 12) *Epipremnum aureum* - Efeutute

Die zusammengefassten Ergebnisse aller Veröffentlichungen können in der folgenden Tabelle abgelesen werden. Die meisten hier aufgelisteten Zimmerpflanzen stammen aus tropischen und subtropischen Gebieten. Sie benötigen demnach einen warmen, feuchten Standort, kommen aber oft auch mit wenig Licht zurecht. Besonders gut zur Entfernung von Schadstoffen eignen sich demnach *Epipremnum aureum* – Efeutute, *Spathiphyllum* - Einblatt, *Dracaena* - Drachenbaum, sowie *Chrysanthemum morifolium* – Chrysanthemum.

Tabelle A2.14 Liste luftreinigender Pflanzen

Pflanze, entfernt primär:	Benzol (NASA 1989)	Formaldehyd (NASA 1989, WOLVERTON 1997)	Trichlorethen (NASA1989)	Xylole und Toluol (WOLVERTON & WOLVERTON 1993)	Annoniak (WOLVERTON & WOLVERTON 1993)
<i>Phoenix roebelenii</i>	X	✓	X	✓	X
<i>Dypsis lutescens</i>	X	X	X	✓	X
<i>Nephrolepis exaltata</i> 'Bostoniensis'	X	✓	X	✓	X
<i>Nephrolepis obliterata</i>	X	✓	X	✓	X
<i>Hedera helix</i>	✓	✓	X	✓	X
<i>Liriope spicata</i>	X	✓	X	✓	✓
<i>Chlorophytum comosum</i>	X	✓	X	✓	X
<i>Epipremnum aureum</i>	✓	✓	✓	✓	X
<i>Spathiphyllum</i> 'Mauna Loa'	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Anthurium andraeanum</i>	X	✓	X	✓	✓
<i>Aglaonema modestum</i>	✓	✓	X	X	X
<i>Chamaedorea seifrizii</i>	X	✓	X	✓	X
<i>Rhapis excelsa</i>	X	✓	X	✓	✓
<i>Sansevieria trifasciata</i> 'Laurentii'	✓	✓	✓	✓	X
<i>Philodendron cordatum</i>	X	✓	X	X	X
<i>Philodendron bipinnatifidum</i>	X	✓	X	X	X
<i>Philodendron domesticum</i>	X	✓	X	X	X
<i>Dracaena reflexa</i>	✓	✓	✓	✓	X
<i>Dracaena marginata</i>	✓	✓	✓	✓	X
<i>Dracaena fragrans</i> 'Massangeana'	X	✓	X	X	X
<i>Ficus benjamina</i>	X	✓	X	✓	X
<i>Gerbera jamesonii</i>	✓	✓	✓	X	X
<i>Chrysanthemum morifolium</i>	✓	✓	✓	✓	✓
<i>Ficus elastica</i>	X	✓	X	X	X
<i>Dendrobium</i> spp.	X	X	X	✓	X
<i>Dieffenbachia</i> spp.	X	X	X	✓	X
<i>Homalomena wallisii</i>	X	X	X	✓	X
<i>Phalaenopsis</i> spp.	X	X	X	✓	X

### 3.6 Eigene Untersuchungen von Zimmerpflanzen zur CO<sub>2</sub>-Fixierung

Jede Pflanze, unabhängig davon ob sie in der freien Natur wächst oder als Zimmerpflanze gehalten wird, produziert Sauerstoff und bindet Kohlenstoffdioxid. In welchem Maße dies erfolgt, kann anhand von Untersuchungen des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Luft festgestellt werden.

Zur Untersuchung der Kohlenstoff-Fixierung von Zimmerpflanzen wurden insgesamt 12 Exemplare anhand folgender Kriterien ausgesucht:

- sehr gute Entfernung der Chemikalien aus der Raumluft (vgl. nach NASA 1989 und Wolverton & Wolverton 1993, 1997)
- schnelles Wachstum, da davon ausgegangen wird, dass je schneller eine Pflanze wächst, desto mehr Biomasse produziert wird und damit die Photosyntheserate erhöht ist

- geringer Pflegeaufwand, und allgemeine Verbreitung als Zimmerpflanze

Eine große Anzahl der untersuchten Zimmerpflanzen wurde vom Gartencenter Brockmeyer in Detmold zur Verfügung gestellt.

### 3.6.1 Untersuchung im Testbehälter

Die Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Fixierung von Zimmerpflanzen fand in einem nahezu luftdichten Behälter statt, mit einem Gesamtvolumen von ca. 0,25 m<sup>3</sup> und den Abmessungen 1m x 0,5m x 0,5m.

Es wurde versucht ideale Bedingungen für eine hohe Photosyntheseintensität zu schaffen. Die Lufttemperatur während der Untersuchungen betrug im Durchschnitt 21°C, die relative Luftfeuchtigkeit > 75 %. Darüber hinaus wurde eine hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration (zwischen 3.000 bis 4.000 ppm) im Behälter hergestellt.

Der Behälter beinhaltet keinen Ventilator zur Durchmischung der Luft. Obwohl das CO<sub>2</sub> aufgrund einer höheren Dichte sich theoretisch im unteren Bereich schichten würde, treten Verwirbelungen auf (durch Undichtheiten, Temperatur- und Druckunterschiede, Gasaustausch der Pflanze, Bewegung der Folie), die zusammen mit der Brownschen Molekularbewegung zu einer Durchmischung der Gase führen.

Für eine ausreichende Versorgung mit Licht wurden die Zimmerpflanzen während der Tag-Perioden mit einer LED-Lampe (Lichtfarbe: kalt-weiß, 6.500 K) beleuchtet, welche nahezu das gesamte Spektrum des sichtbaren natürlichen Lichts (390-780 nm) umfasst. Spezielle Lampen zur Anzucht von Pflanzen sind nicht notwendig, da sie im Gegenteil zu handelsüblichen LED-Lampen ausschließlich rotes und blaues Licht liefern, welches von Pflanzen absorbiert und zur Photosynthese genutzt wird. Ohne grünes Licht erscheinen die Pflanzen schwarz.

Die Dichte des Behälters wurde in mehreren Messungen mit unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen überprüft. Es konnte beobachtet werden, dass je höher die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Behälter im Vergleich zu der Konzentration außerhalb des Behälters war, desto schneller das CO<sub>2</sub> aus dem Behälter entweicht. Ein solcher Ausgleich von Konzentrationsunterschieden wird als Diffusion bezeichnet, die aufgrund der Brownschen Molekularbewegung ein natürlich ablaufender physikalischer Prozess ist. Bestimmte Gase haben dabei unterschiedliche Diffusionsleitfähigkeiten. Kohlenstoffdioxid diffundiert beispielsweise 20- bis 30mal schneller als Sauerstoff (vgl. Sauermost et al. 1999, b). Anhand mehrerer Messungen wurde ein Korrekturfaktor entwickelt, der diesen Umstand berichtigt.

Die CO<sub>2</sub>-Fixierung findet zum größten Teil in den Blättern der Zimmerpflanzen statt. Infolge von unterschiedlich großen Exemplaren musste ein Faktor gefunden werden, welcher ein Vergleich der einzelnen Zimmerpflanzen zulässt.

Eine Möglichkeit bietet die Betrachtung der CO<sub>2</sub>-fixierung pro cm<sup>2</sup> der Blattoberfläche, wie es beispielsweise bei der NASA Clean Air Study erfolgte. Der Versuch die Blattoberfläche der Zimmerpflanzen zu vermessen, erwies sich allerdings als schwierig und inakkurat. Für äußerst genaue Angaben über die Biomasse müsste die Pflanze nach der Messung vollständig getrocknet (aufgrund unterschiedlicher Wasserspeicherfähigkeiten) und anschließend gewogen werden. Eine exakte zerstörungsfreie Erfassung der Biomasse erwies sich aber als kaum möglich. Aus diesem Grund wurden für die Messungen Pflanzen der annähernd gleichen Größe (bis auf zwei- Anthurium und Dieffenbachia) verwendet. Um einen größenunabhängigen Vergleich zu schaffen, wurde die Abgabe von CO<sub>2</sub> in der Nacht bezogen auf die CO<sub>2</sub>-Fixiertrate am Tag in Prozent ausgerechnet.

Um die CO<sub>2</sub>-Fixiertrate und -Abgabe der einzelnen Zimmerpflanzen erfassen zu können, wurde eine Tag- und Nacht-Phase in dem Behälter simuliert. Die gesamte Messung dauerte 24 Stunden, die

einzelnen Phasen jeweils 12 Stunden. Während der Tag-Phase wurden die Pflanzen zusätzlich mit einer LED-Lampe beleuchtet, um möglichst gleiche Lichtverhältnisse zu schaffen. Nach 12 Stunden wurden die Lampen ausgeschaltet und der Behälter wurde für weitere 12 Stunden abgedunkelt.

Insgesamt wurde nur die CO<sub>2</sub>-Konzentration ausgewertet, da aufgrund der Bauweise des Behälters die relative Luftfeuchte und Temperatur stark von den Umgebungsbedingungen abhängig waren und weniger durch die Zimmerpflanzen bestimmt wurden. Besonders ersichtlich wurde dies beim Auswerten von Messungen ohne Zimmerpflanzen.

### 3.6.2 Ergebnisse und Diskussion

Wie bereits beschrieben, ist die von Pflanzen betriebene Photosynthese ein durchaus komplexer Prozess, der von zahlreichen Faktoren, wie


- Entwicklungszustand der Pflanze
- Öffnungszustand der Stomata
- Chlorophyllgehalt
- Qualität und Intensität des Lichts
- Temperatur und relative Luftfeuchte
- Wasser- und Mineralsalzversorgung
- Kohlenstoffdioxidversorgung

gesteuert wird. Daher sollten die gemessenen Werte eher als stichhaltige Probe und nicht eine absolute Bewertung von Zimmerpflanzen angesehen werden. Zudem konnten einige Faktoren nicht bestimmt werden, wie beispielsweise der physiologische Zustand der Pflanzen. Selbst bei einem einwandfreien äußerlichen Erscheinungsbild können unentdeckte Krankheiten, Schädlings- oder Pilzbefall die Photosyntheseaktivität stark reduzieren.

Auch der sog. Pflanzenstress kann zu einer Beeinträchtigung des Stoffwechsels führen. Pflanzenstress ist ein Syndrom von Folgen einer Belastung, die durch äußere, biotische oder abiotische Faktoren verursacht werden kann. Vor allem abiotische Faktoren, wie Temperatur, Wasser, Licht und Nährstoffe können sowohl bei einem Mangel als auch bei einem Überangebot pflanzenschädigend wirken (vgl. Sauermost et al. 1999, c). Ein solcher Pflanzenstress kann trotz idealer Bedingungen während der durchgeführten Messungen aufgetreten sein. Grund dafür können beispielsweise Standortwechsel sein oder ein beim Transport entstandener Kälteschock. Letztendlich hängt die Photosyntheseaktivität stark von individuellem Individuum ab, da sowohl beeinträchtigende als auch begünstigende Faktoren nicht auf jeder Pflanze die gleichen Auswirkungen haben. Für aussagekräftigere Ergebnisse müssten demnach mindestens zwei Pflanzen der gleichen Art und Sorte untersucht werden.

Die folgenden zwei Diagramme zeigen einen Vergleich aller Zimmerpflanzen bezogen auf die Tag- und Nacht-Periode.

Legende:

 <i>Anthurium</i>	 <i>Chamaedorea</i>	 <i>Chlorophytum</i>	 <i>Dieffenbachia</i>
 <i>Dracaena</i>	 <i>Epiphremnum</i>	 <i>Ficus</i>	 <i>Monster</i>
 <i>Nephrolepis</i>	 <i>Phlebodium</i>	 <i>Sanseveria</i>	 <i>Spathiphyllum</i>

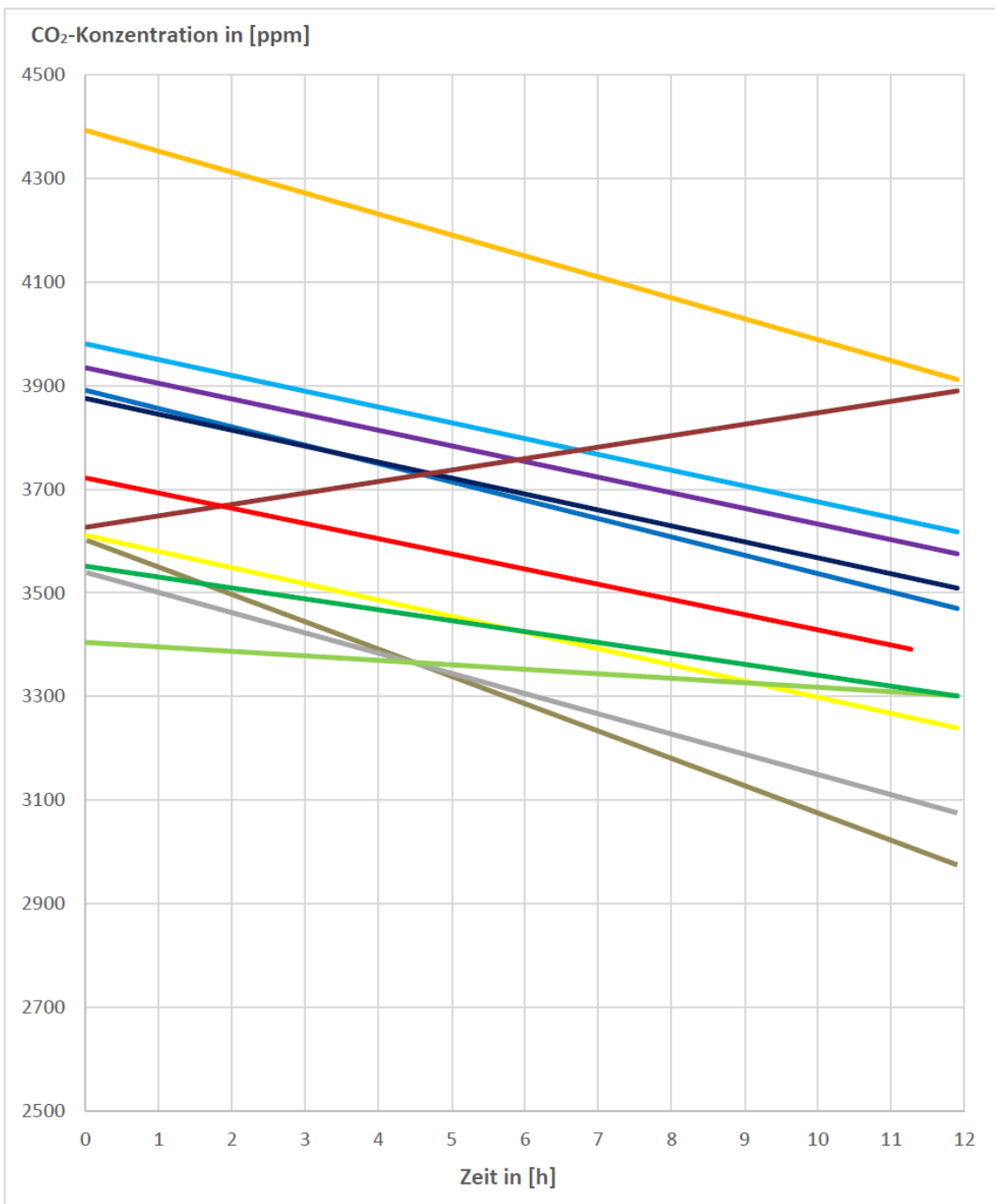


Abbildung A2.61: CO<sub>2</sub>-Fixierrate einzelner Zimmerpflanzen während der Tag-Periode

Bei Betrachtung des Diagramms wird deutlich, dass bis auf eine Pflanze (*Sanseveria* - dunkelrot) alle anderen während der Tag-Periode zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration beitragen. Steiler verlaufende Geraden bedeuten in diesem Fall, dass die CO<sub>2</sub>-Abbauraten Untersuchungen von Zimmerpflanzen zur CO<sub>2</sub>-Fixierung höher ausfiel als bei flacher verlaufender Geraden. Aus dem Diagramm kann zudem abgelesen werden, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu Beginn der Messungen im Bereich von etwa 3.400 – 4.000 ppm lag.

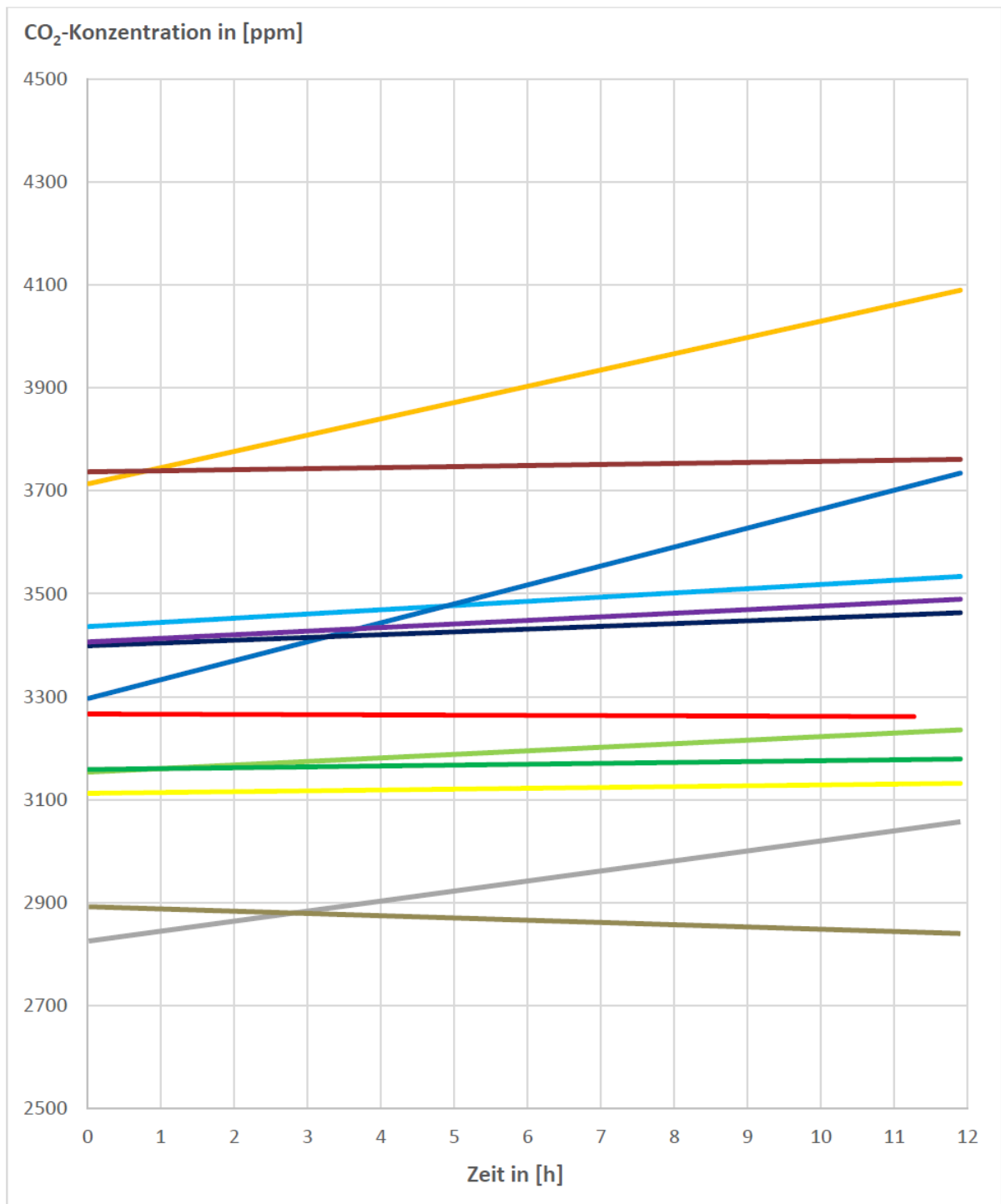


Abbildung A2.62: zeigt die CO<sub>2</sub>-Abbauraten bzw. Abgaberaten während der Nacht-Periode.

Hierbei wird deutlich, dass einige Pflanzen weiterhin CO<sub>2</sub> aus der Luft abgebaut haben (z.B. Chamaedorea - braun), während andere (z.B. Dieffenbachia – orange) sehr viel CO<sub>2</sub> wieder abgegeben haben.

Die Zusammenfassung aller Messergebnisse mit den ermittelten CO<sub>2</sub>-Fixier- und Abgaberaten, unter Einbeziehung des Korrekturfaktors, können aus folgender Tabelle abgelesen werden.

Tabelle A2.15: Ergebnisse der Messungen von unterschiedlichen Zimmerpflanzen (- als Vorzeichen: CO<sub>2</sub>-Assimilation, + als Vorzeichen: CO<sub>2</sub>-Abgabe)

Nr.	Pflanze	Pflanzengröße Höhe, Breite [cm]	CO <sub>2</sub> -Fixierrate – Tag [ppm/h]	CO <sub>2</sub> -Abgabe – Nacht [ppm/h]	Abgabe von CO <sub>2</sub> in der Nacht bezogen auf die CO <sub>2</sub> -Fixierrate am Tag [%]
1	<i>Anthurium</i>	45	- 52,729	+ 19,453	+ 37
2	<i>Chamaedorea elegans</i>	35	- 39,042	- 4,2553	- 11
3	<i>Chlorophytum comosum</i>	30	- 31,25	+ 1,5653	+ 5
4	<i>Dieffenbachia</i>	40	- 40,427	+ 40,455	+ 100
5	<i>Dracaena marginata</i>	30	- 8,657	+ 0,571	+ 7
6	<i>Epiphyllum pinnatum</i>	15	- 21,057	+ 0,980	+ 5
7	<i>Ficus benjamina</i>	20	- 30,498	+ 8,1807	+ 27
8	<i>Monstera deliciosa</i>	40	- 35,395	+ 37,053	+ 105
9	<i>Nephrolepis exalata</i>	20	- 30,785	+ 5,275	+ 17
10	<i>Phlebodium aureum</i>	20	- 30,181	+ 6,973	+ 23
11	<i>Sansevieria trifasciata</i>	30	+ 22,109	+ 1,944	+ 9
12	<i>Spathiphyllum wallisii</i>	20	- 29,341	- 0,042	- 0,1

Beim Betrachten der CO<sub>2</sub>-Fixierrate und der CO<sub>2</sub>-Abgabe sind trotz aller Ungenauigkeiten und unbekannter Faktoren einige Parallelen zu finden. Pflanzen Nr. 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12 weisen mit ungefähr 22 – 39 ppm/h eine relativ hohe CO<sub>2</sub>-Fixierrate und mit max. 7 ppm/h eine vergleichsweise niedrige CO<sub>2</sub>-Abgabe auf.

Das Fensterblatt (Nr. 8) und die Dieffenbachie (Nr. 4) geben nahezu ebenso viel CO<sub>2</sub> in der Nacht ab, wie sie am Tag fixieren konnten. Hierbei ist auch ein Zusammenhang mit der Größe der Pflanzen zu erkennen. Zusammen mit der Flamingoblume (Nr. 1) handelt es sich mit 40-45 cm um die größten untersuchten Exemplare. Ein Grund für dieses Phänomen könnte der Entwicklungszustand der Pflanzen bzw. das Alter sein. Um die genauen Ursachen ermitteln zu können, wäre eine Messung an unterschiedlich großen Pflanzen sinnvoll.

Die Flamingoblume (Nr. 1) weist zudem mit 53 ppm/h die höchste CO<sub>2</sub>-Fixierrate auf, gibt in der Nacht jedoch 19 ppm/h wieder ab.

Der Bogenhanf (Nr.11) ist die einzige Zimmerpflanze, bei der während der Tag-Periode eine CO<sub>2</sub>-Abgabe verzeichnet werden konnte. Die Zimmerpflanze besitzt die Eigenschaft CO<sub>2</sub> nicht Tags, sondern nachts aufzunehmen und in Sauerstoff umzuwandeln. (APP 2018) Der erhöhte CO<sub>2</sub> -Ausstoß am Tag könnte im Zusammenhang mit der Feuchteabgabe bzw. der Öffnungsweite der Spaltöffnungen bei ausreichend viel Wasser stehen oder ein Hinweis auf Pflanzenstress sein.



Betrachten man die gesamte Tag-Nacht Bilanz umgerechnet in Prozent ergibt sich folgende Rangliste:

1. Chamaedorea elegans - 11 %
2. Spathiphyllum wallisii - 0,1 %
3. Epiphremnum pinnatum + 5 %
4. Chlorophytum comosum + 5 %
5. Dracaena marginata + 7 %
6. Sansevieria trifasciata + 9 %
7. Nephrolepis exalata + 17 %
8. Phlebodium aureum + 23 %
9. Ficus benjamina + 27 %
10. Anthurium + 37 %
11. Dieffenbachia + 100 %
12. Monstera deliciosa + 105 %

Somit gehören die Bergpalme und das Einblatt mit Abstand zu den effektivsten Pflanzen im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Fixierung. Im Gegensatz zu den restlichen Zimmerpflanzen konnte bei ihnen zusätzlich eine CO<sub>2</sub>-Abnahme während der Nacht-Periode verzeichnet werden.

Die Efeutute und die Grünstilbe weisen mit 5 % sowie der Drachenbaum mit 7 % eine ebenfalls gute Bilanz auf.

Der Bogenhanf ist dafür bekannt, in der Nacht CO<sub>2</sub> aufzunehmen, jedoch konnte bei dieser Untersuchung eine CO<sub>2</sub>-Zunahme um 9% des Tageswertes verzeichnet werden. Dies soll jedoch nicht als Beweis für die CO<sub>2</sub>-Abgabe von Bogenhanf in der Nacht dienen, sondern weist vielmehr auf Störfaktoren hin.

Der Goldtüpfelfarn, der Aufrechte Schwertfarn, die Birkenfeige sowie die Flamingoblume geben etwa ein Drittel des fixierten CO<sub>2</sub> wieder an die Umgebung ab. Dies entspricht in etwa den, in der Fachliteratur zu findenden, Angaben.

Das Fensterblatt und die Dieffenbachie sind mit einer CO<sub>2</sub>-Abgabe von 100 % und 105 % die uneffektivsten Zimmerpflanzen in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Fixierung. Hierbei sollte beachtet werden, dass die CO<sub>2</sub>-Abgabe real nicht mehr als 100% übersteigen kann, d.h. die Pflanze kann nicht mehr CO<sub>2</sub> abgeben als sie aufgenommen hat. Die 105% sind somit höchstwahrscheinlich durch Messungenauigkeiten oder Einträge von außen zu erklären.

Auffällig war, dass einige Zimmerpflanzen (besonders das Fensterblatt) während der Messungen sehr viel Wasserdampf über ihre Blätter abgegeben haben. Um den Zusammenhang zwischen der Photosyntheserate und der Wasserdampfabgabe untersuchen zu können, müssten die Untersuchungen in einem Kontrollvolumen durchgeführt werden, welches die relative Luftfeuchte unverfälscht erfassen kann.

Wie die Messungen gezeigt haben, ist die Photosynthese von Zimmerpflanzen ein komplizierter Prozess, welcher durch zahlreiche Faktoren gesteuert wird. Manche davon konnten aufgrund der verwendeten Messeinrichtung nicht erfasst werden, sodass bei der Interpretation einiger Messdaten lediglich Vermutungen aufgestellt werden konnten. Zudem traten weitere Störfaktoren auf, die erst

im Laufe der Messungen erfasst, jedoch nicht vollständig minimiert werden konnten. Zu den größten Störfaktoren zählten:

- Individuelles Photosynthesevermögen
- Möglicher, von außen nicht erkennbarer Pflanzenstress
- Unterschiedlicher Entwicklungszustand bzw. Alter der Pflanzen
- äußere Einflüsse (z.B. Raumbelagung, Art der Aktivität), die Auswirkungen auf das Kontrollvolumen hatten -> Folgen: keine präzise Erfassung der (durch Pflanzen bedingten) relativen Luftfeuchte
- Undichtigkeiten des Kontrollvolumens (CO<sub>2</sub>-Verlust)

Aus zeitlichen und organisatorischen Gründen konnten die einzelnen Zimmerpflanzen nicht mehrfach untersucht werden.

Insgesamt konnte den meisten untersuchten Zimmerpflanzen eine Tendenz zu einer Abgabe von etwa einem Drittel des aufgenommenen CO<sub>2</sub> beobachtet werden.

### 3.6.3 Aktueller Stand der Forschung

Die Untersuchungen zu den Abläufen der Photosynthese sind noch nicht abgeschlossen. Laut Wolverton gilt eine hohe Wasserdampfabgabe von Zimmerpflanzen als Indikator für erhöhte Photosyntheseraten bzw. einen hohen Gasaustausch. Demzufolge eignen sich Pflanzen mit einer hohen Transpirationsrate am besten zur Entfernung von Schadstoffen aus der Luft.

Wie kompliziert die im Blattinneren ablaufenden Prozesse sind, konnten Wissenschaftler aus dem Forschungszentrum Jülich und dem Carnegie Institut in Stanford in Kalifornien in neusten Untersuchungen (vgl. Pflanzenforschung 2010) belegen. Ihre Ergebnisse widerlegen bisherige Vorstellungen über die Regulationsmechanismen der Spaltöffnungen. Durch die Studie konnte nachgewiesen werden, dass nicht Licht, sondern vielmehr Wärme die Funktion der Spaltöffnungen im Hinblick auf die Wasserdampfabgabe steuert. Dieser Prozess soll unabhängig von der Photosynthese erfolgen.

Den Forschungen zufolge wird die Wasserdampfabgabe über die von Pflanzenblättern aufgenommene Strahlungsenergie und den daraus resultierenden Veränderungen des Turgor-Druckes gesteuert. Eine zunehmende Wärmestrahlung führt zu Verdunstung des Wassers im Blattinneren. Der Wasserdampf kondensiert an der Blatthaut und erhöht oder verringert den Druck in der Zelle, der zur Öffnung oder Schließung der Spaltöffnungen führt.

Aus diesen Gründen erweist sich das Deuten der Messdaten als sehr schwierig. Allgemein lässt sich dennoch sagen, dass schnell wachsende Pflanzen mehr CO<sub>2</sub> in Biomasse umwandeln und sich somit gut zur Entfernung von Schadstoffen aus der Luft eignen. Absterbende Pflanzenteile setzen die gespeicherte Menge an CO<sub>2</sub> allerdings wieder frei.

Neben den gemessenen Auswirkungen auf das Innenraumklima bzw. die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen haben Zimmerpflanzen zudem einen positiven Einfluss auf die Produktivität und das psychische Wohlbefinden. Zu diesem Ergebnis kam u.a. der britische Forscher MARLON NIEUWENHUIS von der Cardiff Universität in einer Studie aus dem Jahr 2014. Die Produktivität und Zufriedenheit der Mitarbeiter des untersuchten Büros stieg nach Platzierung von Zimmerpflanzen um 15 %. Ähnliche Ergebnisse erzielten KNIGHT und HASLAM unter Laborbedingungen im Jahr 2010. Die Produktivität nach Ausstattung der Räume mit Pflanzen stieg um 17%. Noch stärker, um 32 %, wuchs die Produktivität allerdings, in einem selbst gestalteten Umfeld. (vgl. IBA 2014)

### 3.6.4 Messungen im Raum

Die Messungen wurden in einem Zwei-Personen-Büro an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Lemgo vorgenommen.

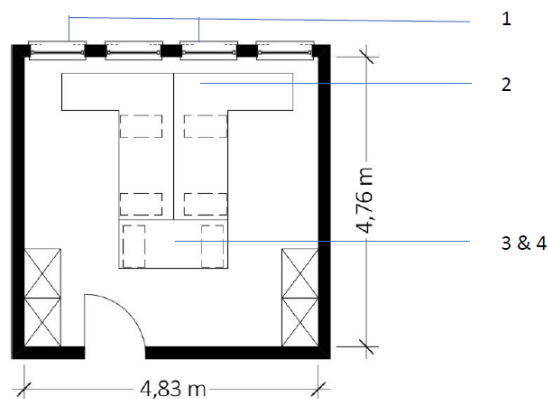


Abbildung A2.63: Grundriss des Büroraumes

Ausrichtung: Südost; Höhe: 3,20 m; Volumen ohne Einrichtung: 73,57 m<sup>3</sup>

Der Büroraum ist an fünf Tagen in der Woche von zwei Personen ab ca. 8:00 Uhr bis 18:30 Uhr besetzt. Die Außenlufttemperaturen schwankten zwischen -2°C und + 11,5°C. Die durchschnittliche Temperatur betrug ca. 5°C.

Um das Lüftungsverhalten erfassen zu können, wurden an zwei Fenstern Reedkontakte angebracht, die das Öffnen und Schließen der Fenster genau dokumentieren. vLogger A (2) war in Fensternähe, Logger B (3) am Arbeitsplatz zusammen mit dem Luftfeuchtigkeitsmesser (4) positioniert. Die CO<sub>2</sub>-Logger erfassen im Intervall von einer Minute die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft sowie die Raumlufttemperatur. Beide Logger wurden auf ca. 1,20 m Höhe über dem Fußboden platziert.

Die erste Messreihe wurde ohne, die zweite mit Zimmerpflanzen durchgeführt. Dabei sollte das Nutzerverhalten (z.B. Lüftungsverhalten) während der Messperioden nicht verändert werden, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse erhalten zu können.

Die erste Messreihe wurde ohne, die zweite mit Zimmerpflanzen durchgeführt. Dabei sollte das Nutzerverhalten (z.B. Lüftungsverhalten) während der Messperioden nicht verändert werden, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse erhalten zu können.

Der Aufbau der Messung erfolgte einen Tag zuvor. Aus organisatorischen Gründen wurden Daten von insgesamt sieben Tagen ohne und sechs mit Zimmerpflanzen erfasst. Davon handelte es sich bei fünf bzw. vier Tagen um Arbeitstage und bei zwei um Tage, an denen der Büroraum nicht besetzt war (Samstag und Sonntag).

Folgende Pflanzen befanden sich während der zweiten Messreihe in dem Büroraum:

- Anthurium – ca. 45 cm
- Chamaedorea elegans – ca. 80 cm
- Chlorophytum comosum – ca. 30 cm
- Dieffenbachia – ca. 40 cm
- Dracaena marginata – ca. 30 cm
- Epiphyllum pinnatum – ca. 2 m
- Ficus benjamina – ca. 20 cm

- *Monstera deliciosa* – ca. 40 cm
- *Nephrolepis exalata* – ca. 20 cm
- *Phlebodium aureum* – ca. 20 cm
- *Sansevieria trifasciata* – ca. 30 cm
- *Schefflera arboricola* – ca. 200 cm
- *Spathiphyllum wallisii* – ca. 20 cm

Beim Auswerten der Daten konnte lediglich ein geringer Unterschied zwischen Logger A und Logger B festgestellt werden. Die gemessene CO<sub>2</sub>-Konzentration weichte nur durch wenige [ppm] voneinander ab. Da die geringen Unterschiede auf die natürliche Luftbewegung zurückzuführen sind, wurden in der nachfolgenden Auswertung nur Daten verwendet, die vom Logger A gespeichert wurden.

Die aussagekräftigsten Vergleiche resultieren an Messtagen mit relativ gleichen Bedingungen. Da das Lüftungs- und Nutzungsverhalten sich (augenscheinlich doch) täglich änderte und unbekannte Faktoren nicht erfasst werden konnten, ist es in diesem Fall sinnvoll, Messtage, an denen das Büro nicht besetzt war, zu vergleichen. Bei Messreihe A handelt es sich um Messtag 3 (Nr. 9) und 4 (Nr. 4), bei Messreihe B um Tag 2 (Nr. 8) und 3 (Nr.2). Die Ausgangs- CO<sub>2</sub>-Konzentration betrug bei beiden Messreihen ca. 1200-1250 ppm.

Anhand des folgenden Diagramms ist zu erkennen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration an während der beiden Messtage mit Zimmerpflanzen schneller gesunken ist. Somit konnte eine positive Wirkung von Zimmerpflanzen bezüglich des CO<sub>2</sub>-Abbaus nachgewiesen werden.

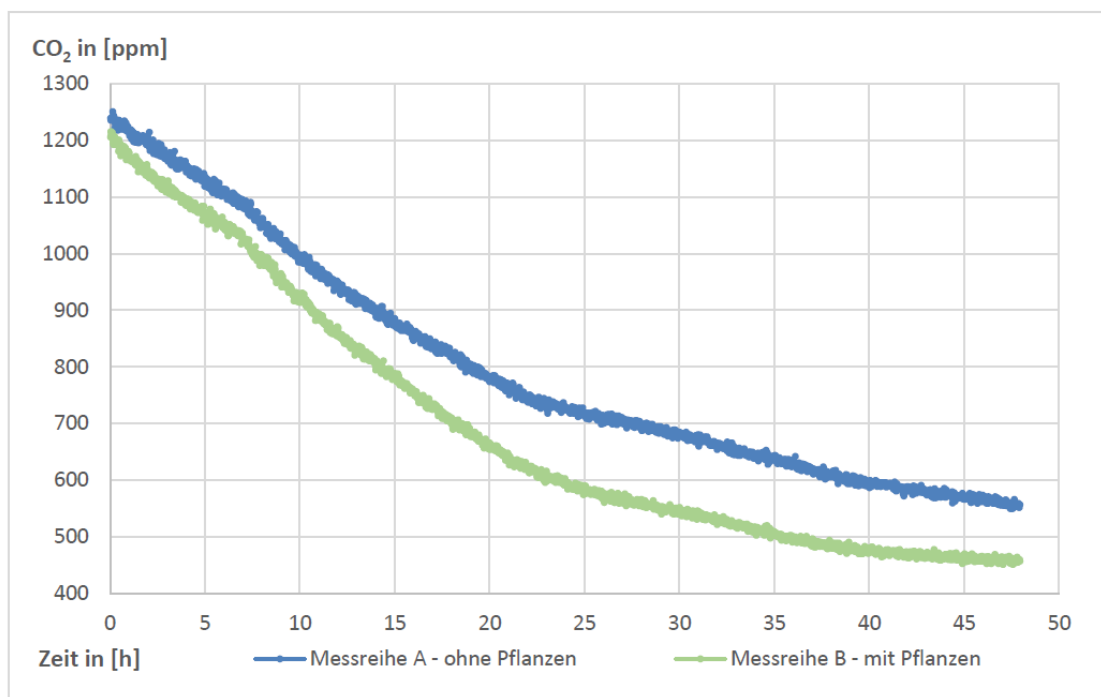


Abbildung A2.64: Vergleich beider Messreihen über einen Zeitraum von 48 Stunden

Darüber hinaus sind keine signifikanten Unterschiede der CO<sub>2</sub>-Anstiegsraten zu erkennen. Neben den bereits genannten ungewissen Parametern erschweren unterschiedliche Tagesabläufe und zum Teil kurze CO<sub>2</sub>-Anstiegsraten (z.B. 30 min) eine präzise Deutung der Messdaten.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration und Pflanzen treffen:

- Zimmerpflanzen reduzieren die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft, jedoch geschieht dies langsam
- Es ist keine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration durch den Gasaustausch von Zimmerpflanzen in den Morgenstunden zu erwarten
- Zimmerpflanzen können als CO<sub>2</sub>-Pufferspeicher betrachtet werden: am Tag nehmen sie CO<sub>2</sub> auf, in der Nacht geben sie einen Teil wieder ab

### 3.6.5 Diskussion

Insgesamt sind während der Messungen zu viele Störfaktoren und unbekannte Parameter aufgetreten, so dass in den meisten Fällen keine präzisen Aussagen getroffen werden konnten. Zu den unbekanntesten Faktoren zählten:

- Photosynthesevermögen der Pflanzen
- Raumbelegung (Personenanzahl, Zeiten)
- das Öffnen und Schließen der Tür
- Angaben über die CO<sub>2</sub>-Konzentration, relative Luftfeuchte und Lufttemperatur im Außenbereich und in angrenzenden Räumen (Flur)
- Art und Dauer der Aktivitäten

Die Dauer der Messung war nicht ausreichend, um genug Vergleiche zwischen den beiden Messreihen erstellen zu können. Dies war zudem bedingt durch unterschiedliche Lüftungs- und Nutzungsverhalten der anwesenden Personen. Ein aussagekräftiger Vergleich könnte nur bei exakt gleichen Bedingungen, die bei dieser Untersuchung nicht gegeben waren, erfolgen.

Insgesamt erfolgt die Assimilation von CO<sub>2</sub> durch Zimmerpflanzen in einem geringen Maß. Die CO<sub>2</sub>-Einträge in die Raumluft durch Personen übersteigen dabei die Fähigkeit der CO<sub>2</sub>-Assimilation von Pflanzen, so dass auf den ersten Blick keine Unterschiede erkennbar sind.

Dennoch konnte ein Vergleich der Tage mit gleichen Bedingungen belegen, dass Zimmerpflanzen zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration beitragen können. Die Produktion von CO<sub>2</sub> durch Zimmerpflanzen während der Nacht übersteigt selbst bei einer hohen Anzahl an Zimmerpflanzen dabei nicht die Verluste, die durch Undichtigkeiten entstehen. Eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration während der Morgenstunden muss daher nicht befürchtet werden.

### 3.7 Kühleffekt durch Zimmerpflanzen

Pflanzen im Innenraum beeinflussen wie eingangs dargestellt wurde, auf verschiedene Arten das Raumklima und das daraus resultierende (thermische) Komfortempfinden der Raumnutzerinnen und -nutzer. Neben der raumakustischen Wirkung, der Luftreinigung von CO<sub>2</sub> sowie weiteren Schadstoffen und nicht zuletzt der psychologischen Wirkung durch Anwesenheit von „Leben und Begrünung“, ist besonders die durch die Pflanzen hervorgebrachte Adiabate Kühlung im Sommer hervorzuheben. Die von der Pflanze bzw. dessen Substrat abgegebene Feuchtigkeit verdunstet und entzieht der Umgebung die für diesen Phasenübergang nötige Energie. In der Folge kühlt die Umgebung entsprechend ab, ähnlich wie beim Schwitzen eines Menschen.

In einer Simulationsstudie wurde untersucht, wie groß dieser Effekt der Adiabaten Kühlung im Fall von Büroräumen sind, exemplarisch wird hier der Grundriss der Büros im geplanten Neubau des Detmolder Freilichtmuseums ist.

### 3.7.1 Randbedingungen der Simulationsstudie

Die Simulationen wurden in Wufi Plus (v3.2.0.1) durchgeführt. Ausschlaggebend dafür waren u. a. die in Wufi Plus korrekte Modellierung von Phasenübergängen der eingetragenen Feuchtigkeiten, siehe (WUFI's Performance and Limitations).

Als Simulationsraum wurde eine Zone bestehend aus sechs Büros mit einer Grundfläche von je 5,5 m x 4,5 m plus einen Flur von 2 m x 14 m Grundfläche gewählt, siehe Abbildung A2.65. Die Gesamtfläche des Simulationsbereichs beträgt 196 m<sup>2</sup>.

Es wurde angenommen, dass unter den Büros Räume mit ähnlichem Innenklima angeordnet sind und als Trennfläche eine Betondecke mit 12 cm Fußbodenaufbau fungiert. Die Außenwände wurden als Holzleichtbau modelliert. Angelehnt an Abbildung A2.65 wurden die nordost- und südwestorientierten Fassaden (links und rechts in Abbildung A2.65) als dreifachverglast ohne Verschattung angenommen. Die Büros wurden mit einer internen Last von je zwei office workern besetzt. Die Innenraumluft wurde mit einer Heizungsanlage auf 20°C konditioniert. Eine weitere aktive Kühlung wurde nicht implementiert. Es wurde ein 0,1-facher Infiltrationsluftwechsel vorgesehen ohne eine weitere natürliche oder mechanische Lüftung, zum einen da Fensterlüftung bei Hitzeperioden ohnehin zu reduzieren ist, zum anderen um die Kühleffekte der Pflanzen (ohne zu große Störwirkung durch Lüftung mit Außenluft) sichtbar zu machen.

Das organische Material der Innenraumpflanzen wurde als Sedum-Substrat implementiert. Dieses wird in der Wufi-Bibliothek mit einer detaillierten Feuchtespeicherfunktion geführt. Die Feuchteabgabe von Pflanzen im Innenraum wird typischerweise bei ingenieurmäßigen Betrachtungen mit 10 - 20 g/h pro Pflanze angegeben (vgl. Dönch 2000). Allerdings wird in (vgl. Künzel 2006) angemerkt, dass diese Werte primär aus Messungen von Pflanzen aus einem natürlichen Standort resultieren und nicht für Innenraumverhältnisse gelten. In (vgl. Künzel 2006) vorgestellte Messungen haben gezeigt, dass diese deutlich niedriger sind. Für diese Simulationsstudie wurde darum wie in (vgl. Künzel 2006) empfohlen wurde, ein Feuchteeintrag von 0,6 g/h in der Nacht und von 2 g/h pro Pflanze tagsüber gewählt. Dies entspricht der Feuchteabgabe eines ca. 25 cm großen Hibiskus. Pro Büro wurden je 8 Pflanzen implementiert und 16 weitere im Flur. Als Außenklima wurde aufgrund ähnlicher geologischer Gegebenheiten das Testreferenzjahr für Kassen (Jahr 2004) verwendet.

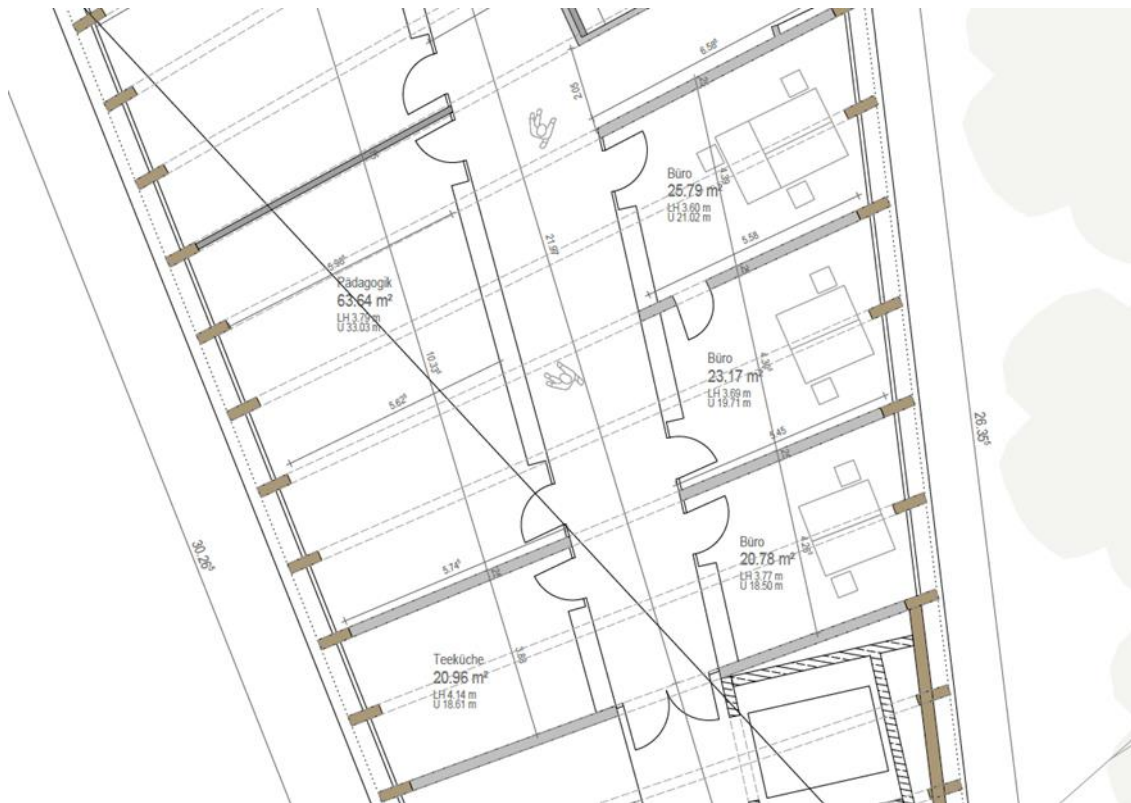


Abbildung A2.65: Die Büroräume im 2. OG des geplanten Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des Detmolder Freilichtmuseums.

### 3.7.2 Ergebnisse der Simulationen

Die Abbildung A2.66 und die Abbildung A2.67 zeigen die Verläufe der Temperaturen und relativen Luftfeuchten über das Jahr außen wie auch innen ohne und mit Pflanzen. Die formulierten Randbedingungen eines minimalen, nur Infiltrationsbedingten Luftwechsels sowie die fehlende Verschattung führen erwartungsgemäß zu hohen Innentemperaturen und hohen Luftfeuchten im Bürobereich im Sommer, da gemäß dem gewählten Ansatz weder (solare) Wärmelasten noch Feuchtelasten abgeführt werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch klar die Kühlwirkung infolge Verdunstungsvorgänge an den Pflanzen sowie am Substrat.

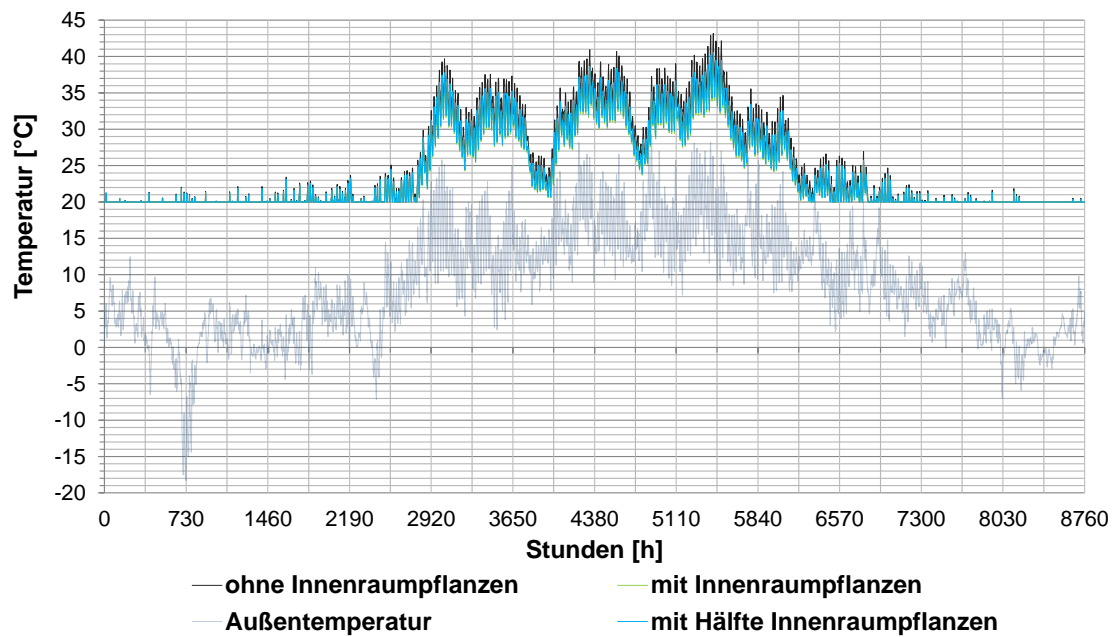


Abbildung A2.66: Jahresübersicht über die resultierenden Lufttemperaturen für verschiedene Innenraumbegrünungen.

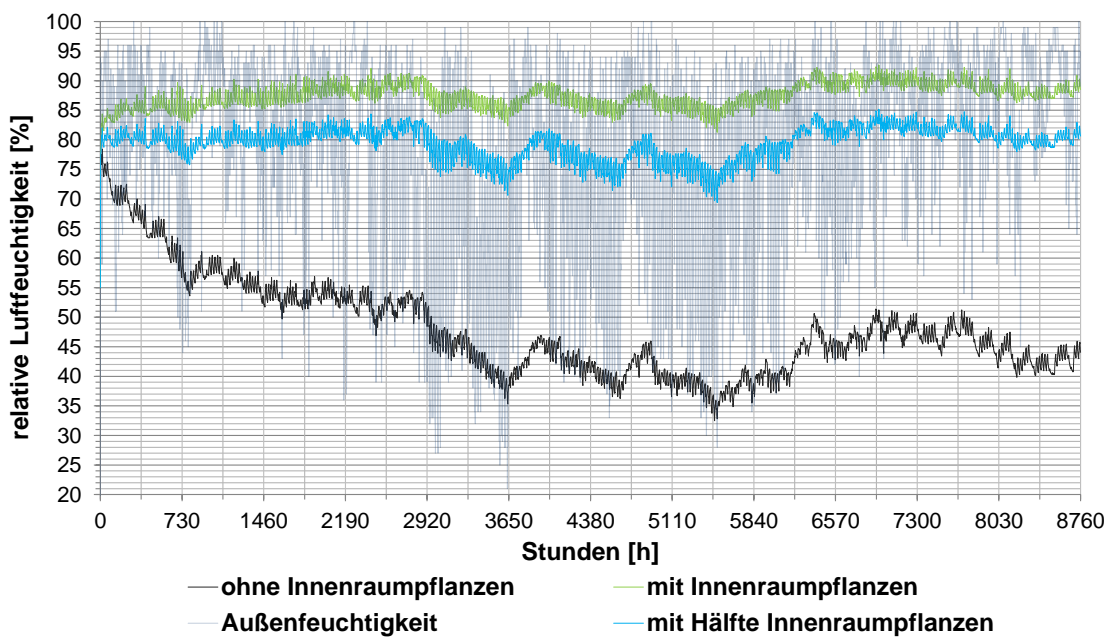


Abbildung A2.67: Jahresübersicht über die resultierenden relativen Luftfeuchten für verschiedene Innenraumbegrünungen.



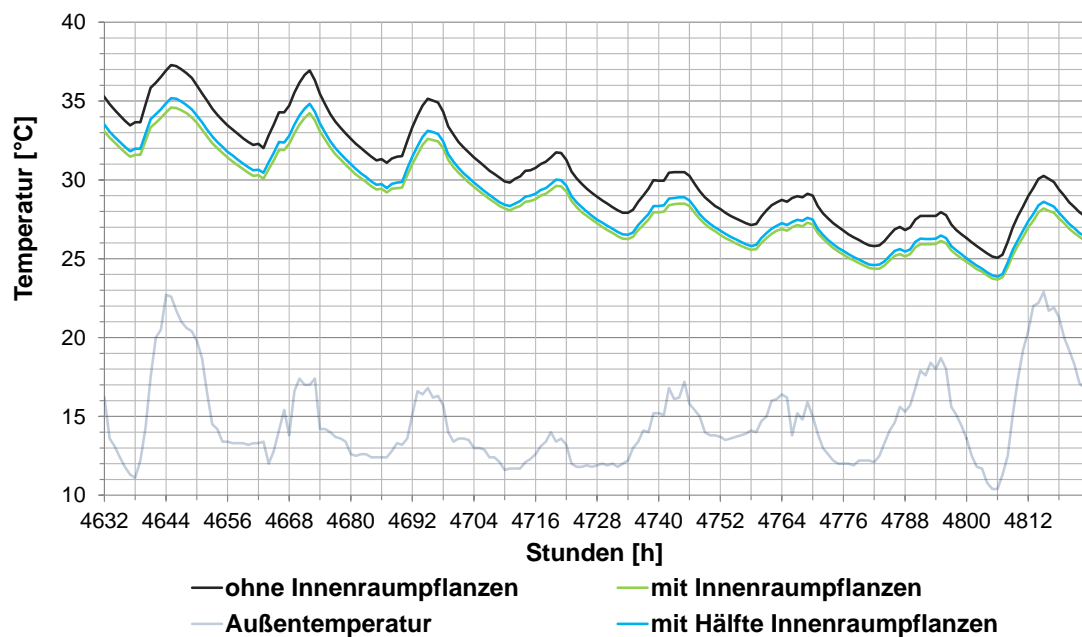


Abbildung A2.68: Wochenübersicht vom 13.07. bis zum 21.07. über die resultierenden Lufttemperaturen für verschiedene Innenraumbegrünungen

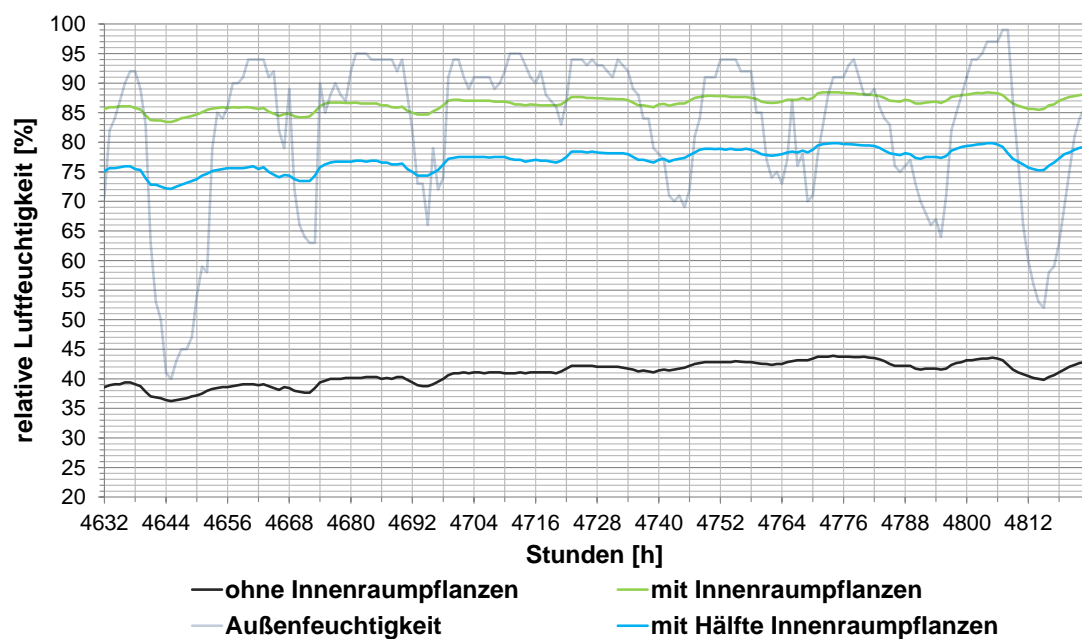


Abbildung A2.69: Wochenübersicht vom 13.07. bis zum 21.07. über die resultierenden relativen Luftfeuchten für verschiedene Innenraumbegrünungen

In Abbildung A2.68 ist der Verlauf der Innentemperatur einer typischen Sommerwoche für die simulierten Büros mit und ohne Begrünung dargestellt. Es zeigt sich, dass mit implementierter Innenraumbegrünung um 2 bis 3 K geringere Innenraumtemperaturen erreicht werden. Damit lässt sich ein signifikanter Kühleffekt durch Adiabate Kühlung feststellen. Bemerkenswert ist, dass dies trotz der sehr hohen Innenraumtemperaturen von teils über 30°C erreicht wird.

Ein weiterer Untersuchungsaspekt war die jeweils benötigte Heizenergie für die verschiedenen Szenarien. Für die „nackten“ Büros ohne Innenraumbepflanzung sind für dieses Szenario eine Heizenergie von 12.854 kWh im Jahr nötig. Bei Bepflanzung wie beschrieben steigt die benötigte Heizenergie auf 14.045 kWh, um der (im Sommer so erwünschten) Verdunstungskälte in der Heizperiode entgegenzuwirken.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung A2.70 und Abbildung A2.71) stellen die Klimaverhältnisse in der Bürozone bei Aktivierung einer hohen Nachtlüftung mit 5-fachem Luftwechsel zwischen 22 und 8 Uhr dar. Tagsüber wird nur vom Infiltrationsluftwechsel (0,1/h) ausgegangen. Zudem wird hier eine konstante Reduzierung des Gesamtenergiedurchlassgrades von Verglasung und Verschattung  $g_{total}$  von 0,4 (Dreifach-Verglasung in leichter Sonnenschutz-Qualität) auf 0,15 (zusätzliche außenliegende Verschattung) angenommen. Es zeigt sich am Beispiel der betrachteten Sommerwoche, die allerdings nicht als besonders heiß gelten kann, dass die Innenlufttemperaturen dank Nachtlüftung und Verschattung im komfortablen Bereich liegen. Die Pflanzen selbst bringen eine Temperaturabsenkung durch ihre adiabate Kühlwirkung von ca. 0,8 K. Deutlicher werden die Unterschiede zwischen der nichtbegrünten und der begrünten Bürozone jedoch bzgl. der sich einstellenden relativen Luftfeuchte (Abbildung A2.71): während der 14-stündigen Tagphase ohne aktive Lüftungstätigkeit steigt die relative Luftfeuchte infolge der pflanzlichen Verdunstung um rund 15% an. Diese Feuchtigkeit wird nachts bei hohem Luftwechsel wieder aus dem Gebäude hinausgeführt.

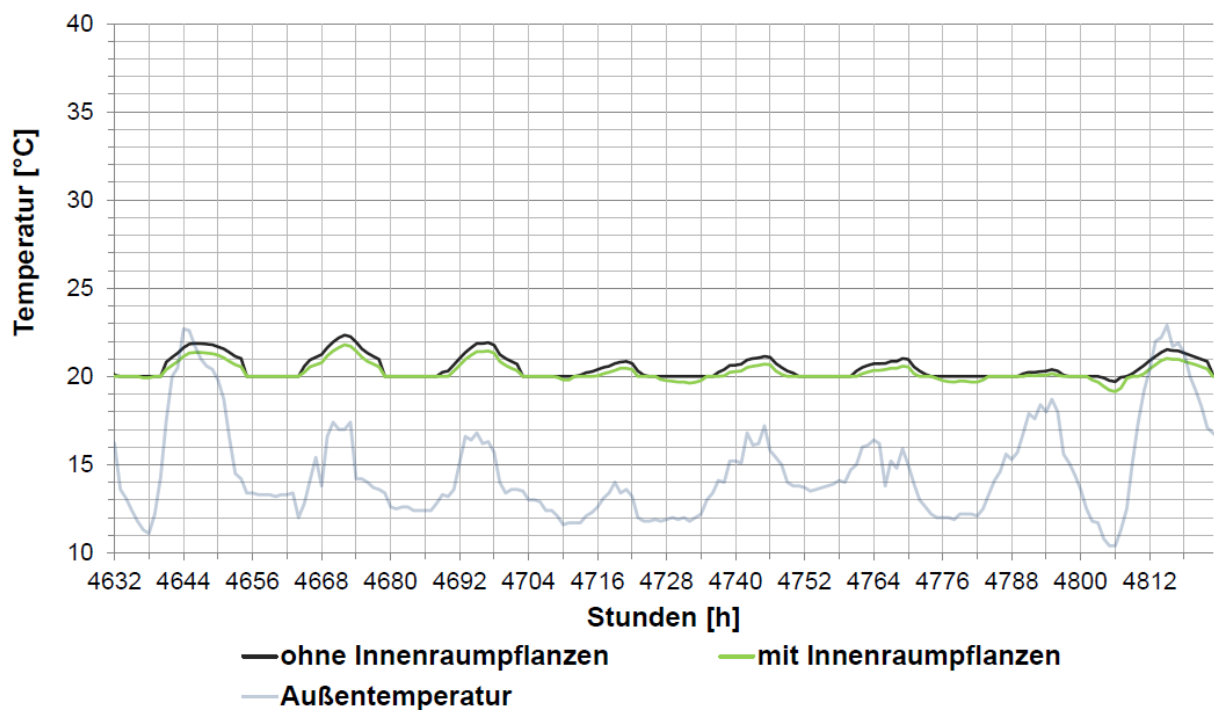


Abbildung A2.70: Wochenübersicht vom 13.07.2020 bis zum 21.07.2020 über die resultierenden (Innenraum-)Temperaturen bei Innenraumbegrünung

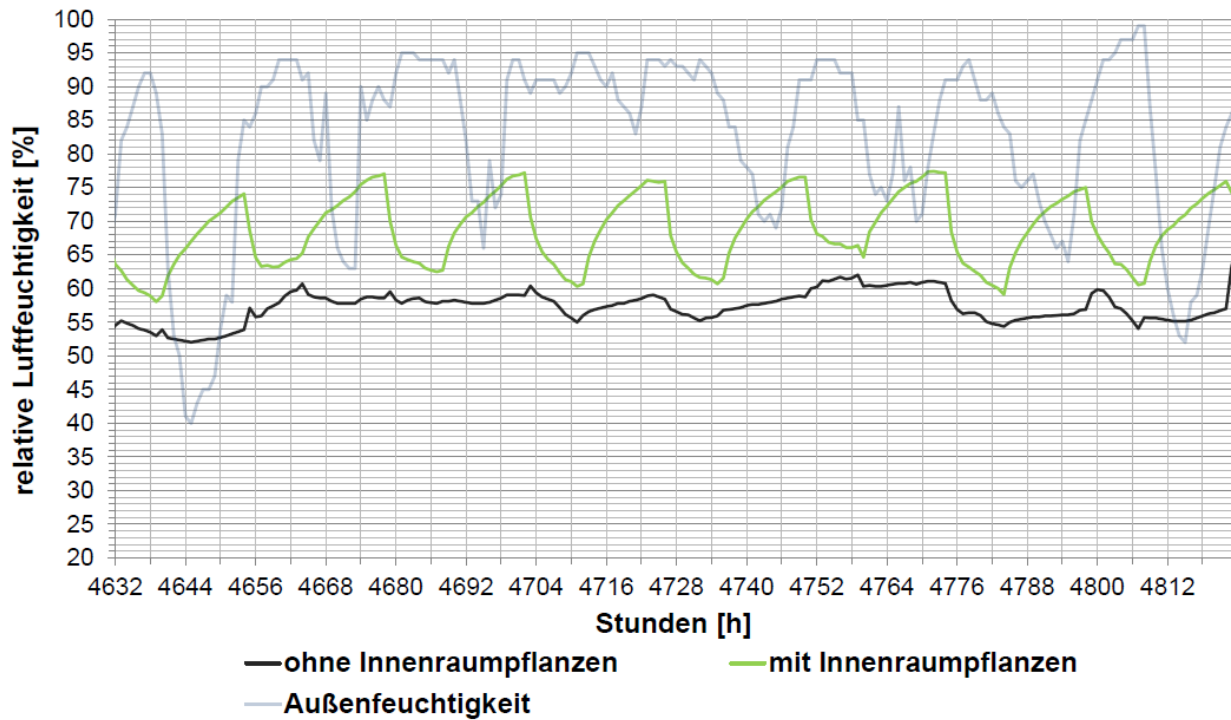


Abbildung A2.71: Wochenübersicht vom 13.07.2020 bis zum 21.07.2020 über die resultierenden relativen Luftfeuchtigkeit bei Innenraumbegrünung.

Allgemein lässt sich feststellen, dass im Innenraum platzierte Pflanzen eine Kühlung der Raumluft bewirken, dies jedoch in der Heizperiode mit einer Erhöhung der benötigten Heizenergie einhergeht. Die Ausweitung der Simulationen, ausführliche Labormessungen und vor allem ein langfristiges Monitoring von Vergleichsräumen mit und ohne Grünpflanzen schafft forschungsseitig die Grundlagen für die Beurteilung dieser natürlichen Klimatisierungsmethode.

## – Anhang A3 –

### Arbeitsgruppe 4 Lebenszyklusanalyse, Baustoffe, Rezyklierbarkeit

Wesentliche Aspekte des dritten Arbeitspaketes (Ökobilanz und Lebenszyklus) wurden bereits in der ersten Arbeitsgruppe gemeinsam mit den Architekten erörtert und dargestellt. Insbesondere die Materialdiskussion ließ sich schlecht trennen. Aus diesem Grunde sollen hier im Anhang im AG III erster Linie einzelne Berechnungsergebnisse und Daten zur Ökobilanz dargestellt werden.

Einleitung:

Angesichts des Klimawandels und der Tatsache, dass das Baugewerbe für ca. 50% Prozent des weltweiten Ressourcenverbrauches verantwortlich ist, ist es mehr als notwendig, in anspruchsvollen Projekten den Beweis zu führen, dass es auch anders geht - dass mit Intelligenz und unter Nutzung heutiger Möglichkeiten eine nachhaltige Bauweise im Sinne der Brundlandt-Definition möglich ist.

Das neue Empfangsgebäude des Freilichtmuseums Detmold kann aus vielen Gründen zu einem solchen Leitprojekt werden. So wurde bereits in der Auslobung zum Architekturwettbewerb der Wunsch nach der „Errichtung eines ökologisch beispielhaften Museums“ formuliert (LWL, 2018), hat mit acms ein Architekturbüro gewonnen, welches diese Nachhaltigkeit auch lebt und findet sich schlussendlich mit dem Freilichtmuseum ein Bauherr/Nutzer, der in besonderer Weise mit Baustoffen, dauerhaften Konstruktionen und einer energiearmen Bauweise vertraut ist, wie sie Jahrhunderte lang nötig und möglich war, und der deswegen besondere Ansprüche an sein Haus stellt. In der Nutzung kann dieses Haus mit all seinen Besonderheiten schließlich vielen Besuchern präsentiert werden und somit eine Brücke schlagen zwischen modernem Bauen und moderner Architektur und einem nachhaltigen, materialgerechtem Bauen.

Hierfür ist es notwendig, sich die heutigen und traditionellen Baumaterialien aus ökologischer Sicht anzuschauen, ihre funktionalen Anforderungen und den Herstellungsaufwand zu analysieren und vergleichend gegenüberzustellen:

#### 1 Ökobilanz und Datengrundlage

Speziell für ein Gebäude, das während seiner Nutzungsphase wenig Energie verbraucht und damit vielleicht nur geringe Umweltauswirkungen verursacht, gewinnt die Betrachtung der Herstellungsenergie und – emissionen immer mehr an Bedeutung. Aus diesem Grund wurde auch im vorliegenden Projekt von vorneherein eine Ökobilanz für verschiedene Konstruktionen vergleichend parallel zur Entwurfsplanung gerechnet. Hierbei konnten zahlreiche Hinweise gegeben und Empfehlungen für bestimmte Materialien und Aufbauten ausgesprochen werden, die auch aufgegriffen wurden. Aufgrund fehlender Daten (oder mangelnder Kommunikation) lagen aber bis zu jetzigen Zeitpunkt noch keine Daten für die Betriebsphase des Gebäudes vor, so dass in dieser ersten Forschungs- und Begleitphase hierzu noch keine Aussagen gemacht werden können. Ebenfalls aktuell ausgeblendet ist eine rechnerische Bewertung des Rückbaus/ End-of-life (Eol, bzw. Entsorgungsphase C1-4 in Abbildung A3.1). In Abweichung zu dem unten gezeigten Ablauf erfolgt die Betrachtung dieser Phase für das Projekt in Ansätzen deskriptiv, da alle Projektbeteiligten sich einig in der Absicht sind, Baumaterialien oder Konstruktionen entweder jetzt schon im zweiten Lebenszyklus zu nutzen oder aus diesem Gebäude später einem zweiten Lebenszyklus zu zuführen. Von diesem Ausgangspunkt aus kann schließlich eine Bauausführung gewählt werden, die Anforderungen des Nutzers mit den besten ökologischen Qualitäten vereint.

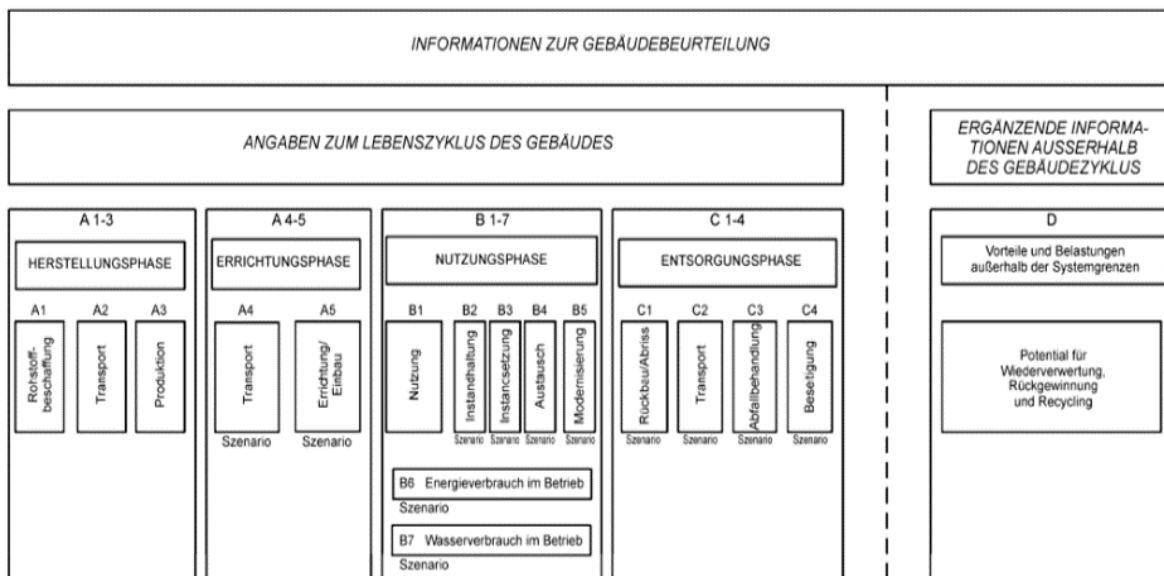


Abbildung A3.1: Anzeige modularer Informationen für die verschiedenen Lebenszyklusstadien des Gebäudes nach EN 15804:2012

Für die Bewertung der Schritte (Material-)herstellung und Errichtungsphase wird das Datenmaterial der ÖKOBAUDAT, aus dem Informationsportal nachhaltiges Bauen des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BIBH) genutzt (Abbildung A3.1).

Die ÖKOBAUDAT ist eine "standardisierende Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken aller Art", die vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BIBH) seit einigen Jahren Angeboten wird. Die ÖKOBAUDAT ist eine ausführliche Online-Datenbank, die für viele Baumaterialien den, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen in Ökobilanz-Datensätze aufweisen kann. Die in der ÖKOBAUDAT veröffentlichten Datengrundsätze sind jederzeit kostenfrei zugänglich. Unter dieser Voraussetzung kann der Lebenszyklus eines Bauwerks theoretisch vollständig dargelegt werden. Teilweise existieren für die zu bilanzierenden Materialien noch keine Ökodatensätze. In diesem Fall wurden die Daten möglichst ähnlicher Materialien für die Berechnungen verwendet.

In der Datenbank werden die Informationen zu einzelnen, bisher erfassten Baustoffen in verschiedenen Wirkkategorien dargestellt (EN15804, 2020-03). Die hier vorliegende Betrachtung konzentriert sich hierbei auf;

**PE<sub>ne</sub>** Die *Primärenergie nicht erneuerbar*: beschreibt den Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie für einen Prozess (inkl. der ggf. auch erneuerbaren Primärenergieträger die in dem Prozess verbraucht werden. Ziel dieser Kategorie ist die Schonung fossiler Ressourcen, in dem niedrige Werte angestrebt werden sollen

**PE<sub>e</sub>** Die *erneuerbare Primärenergie* beschreibt den Gesamteinsatz erneuerbarer *Primärenergie für einen Prozess (inkl. der erneuerbaren Primärenergieträger)*. Ziel dieser Kategorie ist der Ausbau und verstärkte Einsatz erneuerbarer Energie.

**GWP** das *Global Warming Potential*, oder auf Deutsch Treibhauspotential fasst die Wirkung/Menge verschiedener Gase zusammen, die am sog. Treibhauseffekt, also der Reflektion der infraroten Strahlung an der Erdatmosphäre und damit an der globalen Erwärmung beteiligt sind. Referenzgröße ist der Leitindex CO<sub>2</sub> auf den die anderen Gase definierten Faktoren je nach ihrer Schädlichkeit und Verweildauer in der Atmosphäre umgerechnet werden. Dieses Kriterium ist aus Sicht des Forschungsteams aktuell das Bedeutendste.

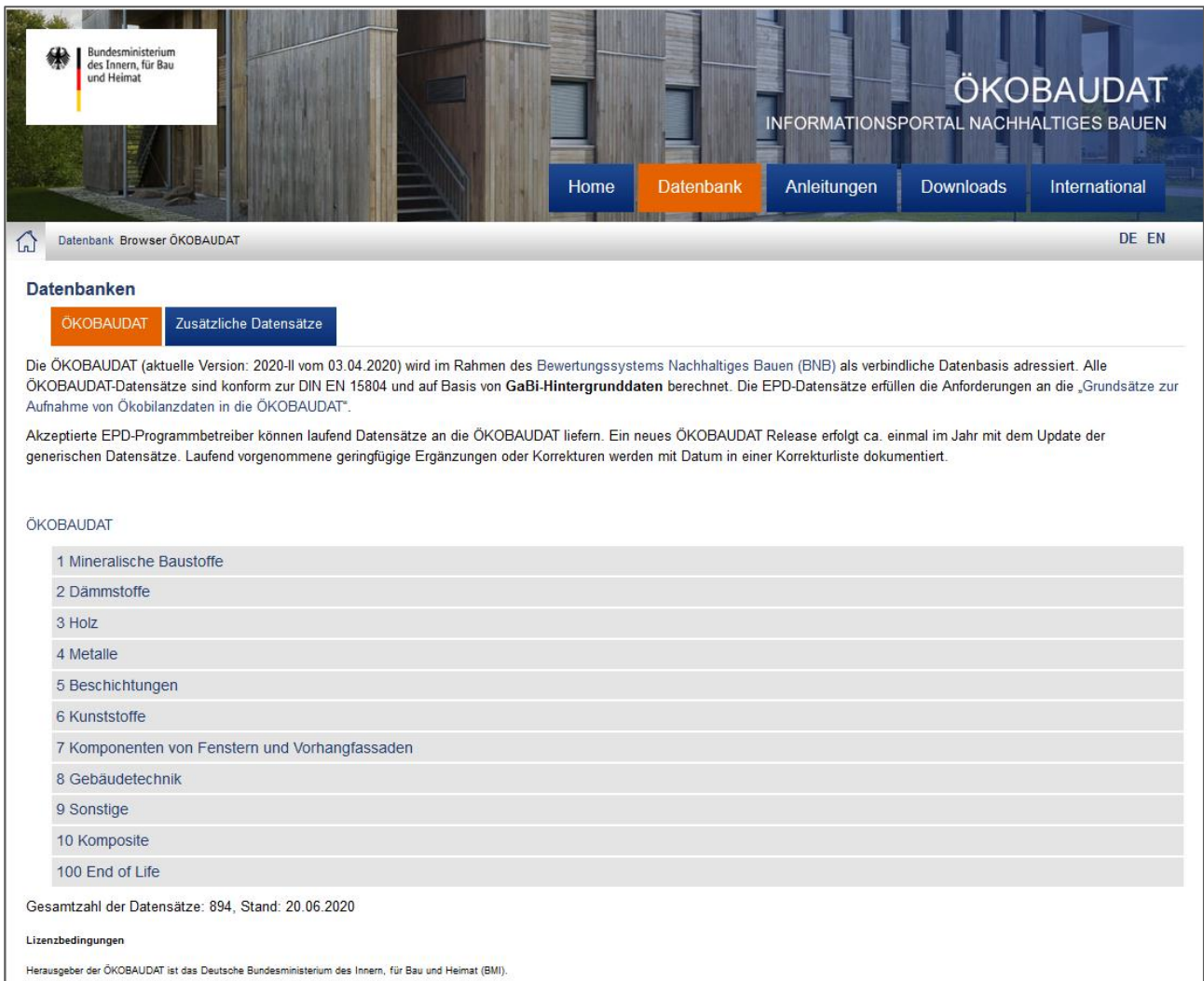


Abbildung A3.2: Ausschnitt aus der Internetseite ÖKOBAUDAT;  
Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019)

Im vorliegenden Projekt findet die Datei der ÖKOBAUDAT in der Version 2020-II vom 03.04.2020 Verwendung. Auf eine Aktualisierung des Datensatzes während der Betrachtung wurde in Anbetracht der kurzen Projektlaufzeit (4 Monate) verzichtet.

## EPD

Die Ökobilanzdaten für die verschiedenen Materialien werden dabei auf der Grundlage der DIN 14040/44 in Form von sog. EPD's zusammengefasst. EPD ist die Abkürzung für „Environmental Product Declaration“ also für eine Umwelt-Produktdeklaration. „Eine EPD beschreibt Baustoffe, Bauprodukte oder Baukomponenten angesichts ihrer Umweltwirkungen auf der Grundlage von Ökobilanzen sowie ihre funktionalen und technischen Beschaffenheit. Diese quantitativen, objektiven und verifizierten Angaben beziehen sich auf den gesamten Lebenszyklus des Baumaterials. Deshalb bilden EPDs eine wichtige Basis für die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken.“ (IBU, 2021).



Abbildung A3.3: Beispiel einer Umwelt-Produktdeklaration (EPD) von Konstruktionsvollholz  
[<https://ibu-epd.com/epd-programm>]

Neben den gesetzlich vorgeschriebenen Kennzeichnungen für Produkte — zum Beispiel die CE-Kennzeichnung — existieren drei verschiedene Kategorien freiwilliger Umweltkennzeichnungen, wobei die EPD dem Typ III-Umweltkennzeichen eingeordnet wird: In einer Umwelt-Produktdeklaration (EPD), wie sie vom IBU abgegeben wird, werden die wissenschaftlich bestimmten Werte aus der Ökobilanz eines Produktes nach einem gleichartigen Grundprinzip kombiniert und dokumentiert. Nüchtern, sachlich, wissenschaftlich hinterlegt und ohne Wertung. Genau darin besteht der Unterschied zu Typ I- und Typ II-Umweltkennzeichen. Die EPD sind keine Zertifikate. Es werden keine Forderungen an die Produktqualität gestellt, vielmehr an die Qualität und das Format der Daten. Vor Veröffentlichung der EPD durch das IBU, wurden die Umwelt-Produktdeklaration von autonomen Dritten auf Vollständigkeit, Nachvollziehbarkeit und Normen Übereinstimmung geprüft und beglaubigt.

Mithilfe dieser EPDs für Baustoffe, Bauprodukte und Baukomponenten kann der ökologische Aspekt in die Nachhaltigkeitsberechnung von Bauwerken einfließen. Das Format schafft die Grundlage für die Begutachtung und Beurteilung von Bauwerken und ist geeignet für die Identifizierung von Baumaterialien mit sehr geringen Umweltwirkungen.

### 1.1 Betrachtungszeitraum/ Nutzungsdauer von Bauteilen

Die Nutzungsphase eines Gebäudes bzw. richtiger der Betrachtungszeitraum einer Ökobilanz ist ein wesentliches Kriterium für die Berechnung. Auf der einen Seite kann über diese Zeit die Betriebsenergie des Gebäudes aufsummiert werden und so bei wechselnden Bauteilqualitäten eine Entscheidungshilfe sein, auf der anderen Seite können notwendige Renovierungen über die Nutzungsdauer einzelner Bauteile berücksichtigt werden. Auf der Internetseite des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BIBH) in Zusammenarbeit mit dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) besteht ein Informationsportal „Nachhaltiges Bauen“, das Nutzungsdauern von Bauteilen in detaillierten Tabellen zum Download zu Verfügung stellt (Abbildung A3.3).

Code Nr.	KG - 2. Ebene	KG - 3. Ebene	Bauteil / Material	a	Ersatz in 50a
	320 Gründung				
	320 Gründung	322 Flachgründungen			
322.111			Einzel- / Streifenfundamente	≥ 50	0
322.112			Fundamentplatten	≥ 50	0
	320 Gründung	323 Tiefgründungen			
323.111			Bohrpfähle, Presspfähle, Rammpfähle, Pfahlwände, Schlitzwände, Spundwände, Trägerbohlwände	≥ 50	0
	320 Gründung	324 Unterböden und Bodenplatten			
324.111			Bodenplatte	≥ 50	0
	320 Gründung	326 Bauwerksabdichtung			
326.111			Abdichtung gegen nichtdrückendes Wasser	35	1
	330 Außenwände				
	330 Außenwände	331 Tragende Außenwände			
331.111			Mauerwerkswand	≥ 50	0
331.211			Betonwand	≥ 50	0
331.311			Holz wand	≥ 50	0
331.411			Stahlbauwand	≥ 50	0
331.511			Lehmbauwand	≥ 50	0
331.611			Formsteine mit Betonfüllung	≥ 50	0
	330 Außenwände	333 Außenstützen			
333.111			Mauerwerksstütze	≥ 50	0
333.211			Betonstütze	≥ 50	0

Abbildung A3.4: Nutzungsdauer von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach (BIBH, 2017)

Für die Betrachtung im Rahmen dieses Projektes wurde der Bilanzzeitraum auf 50 Jahre festgelegt. Dies ist auf der einen Seite so lang, dass erste Erneuerungszyklen berücksichtigt werden, auf der anderen Seite so kurz, dass von einem Erhalt und Betrieb des Gesamtgebäudes über die Nutzungszeit ausgegangen werden kann.

Die Angaben in der Tabelle des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung - beruhen auf folgenden Betrachtungsweisen nach (BIBH, 2017) :

- Die Tabellen nehmen vorausgesetzte mittlere Nutzungsdauern von Bauteilen als Eingangswerte für die Lebenszyklusberechnungen an.
- Die Nutzungsdauerangaben charakterisieren während des Prognoseszenarios die angenommene Zeitspanne, nach der ein heute eingebautes Bauteil vermutlich ausgetauscht werden muss. Die Aussagen beruhen sowohl auf Literaturangaben als auch auf Erfahrungswerte von



*Experten. Gleichwohl wurden neben technisch-funktionalen Betrachtungsweisen auch Erneuerungen auf Grund gesetzlicher Anforderungen sowie ästhetisch bedingte Aspekte in den Angaben berücksichtigt.*

- *Drauf zu achten ist, dass sich beim Betrachtungszeitraum abweichende Zeithorizonte aufeinander treffen und überschneiden, wie Beispielsweise:*
  - *Das Grundstück, den Gebäudelebenszyklus und die Bauteillebenszyklen*
  - *Das BNB-System betrachtet die ersten 50 Jahre im Lebenszyklus*
  - *Der Lebenszyklus eines Baumaterials kann größer oder kleiner als der Betrachtungszeitraum / Gebäudezyklus sein.*
  - *Ausschlaggebend für die Gesamtbeurteilung auf Gebäudeebene im BNB-System ist der Austauschzyklus, quasi wie oft muss ein Bauteil während des Betrachtungszeitraums von 50 Jahren erneuert werden. Diesbezüglich wird in der untersten Spalte der Tabelle eine entsprechende Auskunft gegeben.*

## **1.2 Transportvorgänge**

Nach EN 15804 wird im Rahmen einer Ökobilanz zwischen mehreren Arten des Transportes unterschieden (Abbildung A3.1). Aufgeführt werden der Transport des Rohstoffes zum Hersteller (A2), der Transport zwischen Hersteller und Baustelle (A4) sowie Transporte in der Entsorgungsphase (C2).

Bei genauerer und reflektierender Betrachtung der Transporte stellt man fest, dass die Transportvorgänge zu A4 nicht in einer allgemeinen Datenbank geregelt sein können, sondern dass die Distanzen zwischen Hersteller und Baustelle tatsächlich individuell für das jeweilige Bauvorhaben und Material berechnet werden müssen, um individuelle Entscheidungen treffen zu können. Das Problem ist, dass hierdurch die allgemeine Vergleichbarkeit von Gebäuden gleicher Nutzung erschwert wird. Einige der Datensätze versuchen dies mit pauschalen Angaben (z.B. 30 km) in ihrer Bilanz mitzubilden, eine Distanz, die dann auch für die Transporte zum Entsorger (C2) wieder aufgegriffen wird/werden kann. Für die spezialisierten Hersteller eines sehr ökologischen Materials ist es natürlich auch nicht von Interesse lange Transportwege berücksichtigt zu sehen. In der Praxis kann es aber hierdurch vorkommen, dass ein zunächst weniger ökologisch wirkendes Produkt durch die regionale Verfügbarkeit für die konkrete Bauaufgabe zu einer besseren Wirkungsbilanz führt.

Sensitivitäts-Analysen zu diesem Thema sind den Verfassern bisher nicht bekannt, so dass die Ergebnisse einer derartigen Betrachtung tatsächlich von Interesse sein sollten.



Abbildung A3.5: Transportbeispiel Fahrmischer für Ortbeton [ohne Quelle]

Im vorliegenden Projekt wurden die (wenigen) pauschalen Daten zu A4 bisher nicht berücksichtigt, der Herstellungsprozess umfassen nur die Bilanzgrößen zu A1 bis A3.

## 2 Materialien

### 2.1 Holz

Holz ist weltweit eines der am häufigsten gehandelten Materialien. Entsprechend sorgfältig sollten wir mit dieser Ressource umgehen. Doch das Gegenteil ist der Fall: Zwischen 1990 und 2015 wurden 239 Millionen Hektar Naturwald vernichtet – eine Fläche mehr als 6mal so groß wie Deutschland – ohne nachhaltige Wiederaufforstung (Waldbericht, 2018). Der größte Teil dieser Flächen lag in den Tropen und musste für landwirtschaftliche Anbaubereiche von Palmöl und Soja weichen. Über die Auswirkungen auf das Weltklima und die Artenvielfalt soll hier nicht eingegangen werden - auch wenn sie möglicherweise ausschlaggebend für den beobachteten, anthropogenen Klimawandel sind.

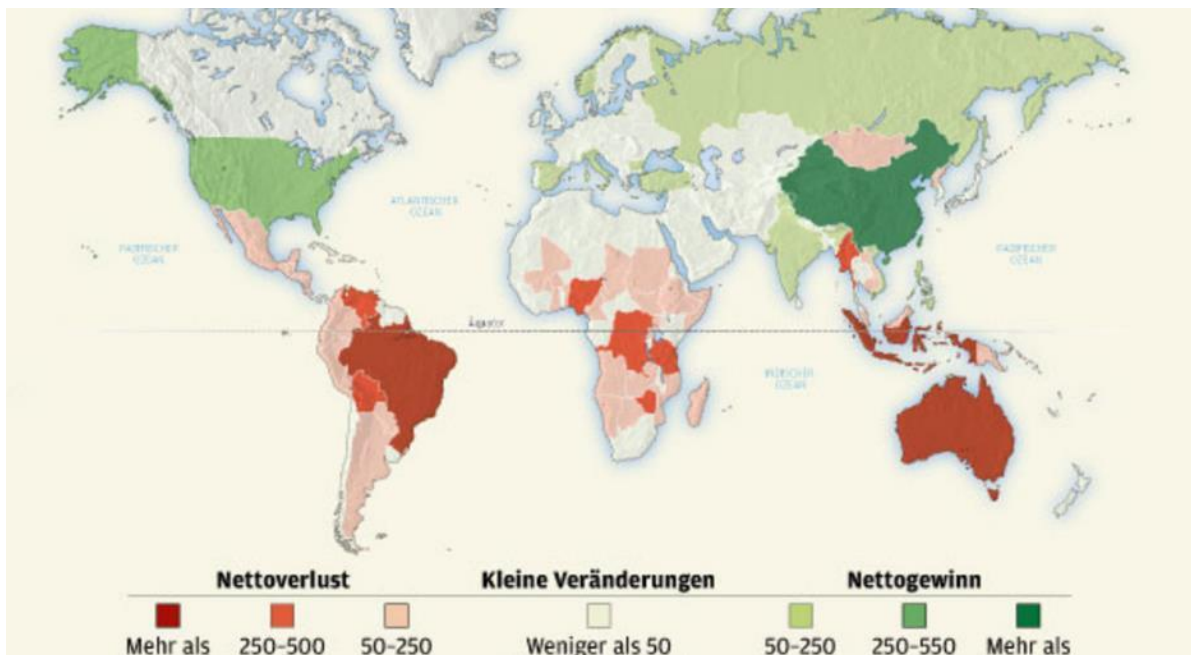


Abbildung A3.6: Waldbilanz zwischen 2005-2010  
– neuere Daten existieren, sind aber wenig besser, s. wwf-waldbericht 2018

Dagegen wird der deutsche Wald vergleichsweise nachhaltig bewirtschaftet (Abbildung A3.6). Für die Forstwirtschaft steht seit Jahren fest, dass für jeden gefälltten Baum ein neuer angepflanzt werden muss oder noch besser, dass aufgeforstet werden sollte, wo immer das möglich ist. Entsprechend ausgeglichen ist die hiesige Waldbilanz, es sind in Europa flächenmäßig sogar leichte Zuwächse an Waldgebiet zu beobachten. Hier sind es eher die Klima- und Wetterschäden sowie Monokulturen vergangener Jahre, die zu einer großflächigen strukturellen Zerstörung des Waldes führen, der damit über Generationen wieder repariert werden muss/kann.

Deutschland ist zu knapp einem Drittel mit Wald bedeckt. Nach Angaben des Bundeswirtschaftsministeriums werden in Deutschland im Mittel ca. 76 Mio m<sup>3</sup> Holz eingeschlagen. Bei einem jährlichen Verbrauch von etwa 135 Mio. m<sup>3</sup> werden somit 43% des Volumens importiert um unseren Bedarf zu decken. Hiervon geht allerdings auch ein großer Teil in die Zellulose und Papierproduktion. Möglich wäre ein Einschlag von ca. 120 Mio. m<sup>3</sup> ohne eine nachhaltige Forstwirtschaft zu gefährden.

Für die Bauaufgabe am FLM Detmold lässt sich hieraus neben der selbstverständlichen Vermeidung von Tropenhölzern ableiten, dass mit regionalen, in nachhaltiger Forstarbeit angebaute Hölzern gearbeitet werden muss. Noch besser wäre die Verwendung von Althölzern, die in einem zweiten Lebenszyklus neue Aufgaben übernehmen könnten.

### 2.1.1 Kreislaufwirtschaft

Lebenszyklus-Analysen beschäftigen sich schon lange mit dem Thema der Wiederverwertung. Aktuell bekommt es durch Schlagworte bzw. Bewegungen wie „Cradle-to-Cradle“ oder „Urban mining“ eine neue Dynamik, auch wenn die Nutzung von Baumaterialien aus Ruinen/Abbruch schon den Römern bekannt war.

„Cradle-to-Cradle“ steht in dieser Bewegung für einen vollständigen Produktkreislauf, der, im Unterschied zu den Römern, bereits von Beginn an, zum Zeitpunkt des ersten Einsatzes mitgeplant und mitgedacht werden soll. Auf diese Weise soll jegliche Arten von Abfall verringert werden und möglichst jeder Stoff, jede Ressource wiedergenutzt werden. Im Unterschied hierzu ließ sich das bisherige Vorgehen eher als „Cradle-to-Grave“ Prinzip beschreiben, bei dem Dinge genutzt, verbraucht und danach entsorgt werden. (Abbildung A3.7)

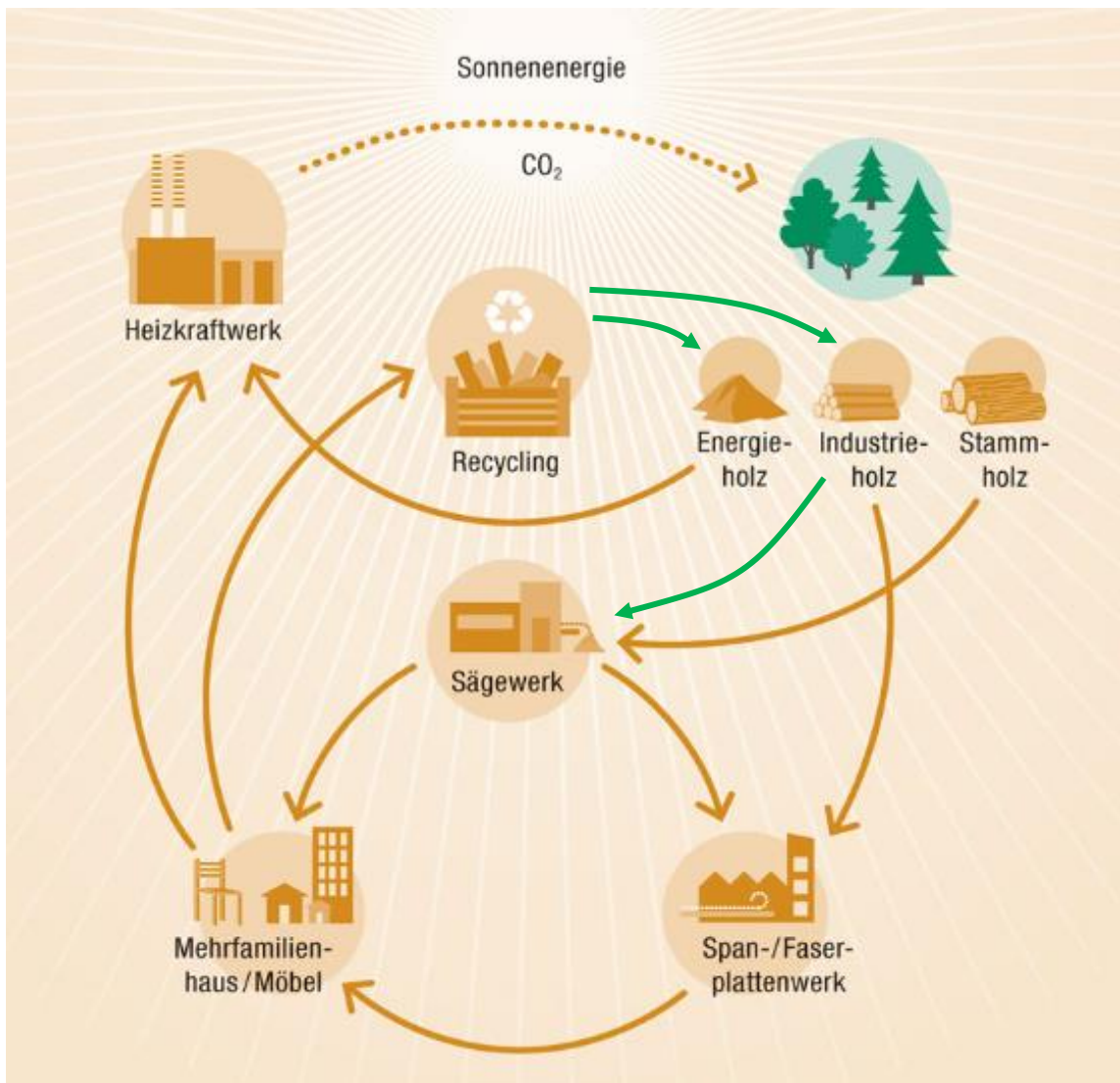


Abbildung A3.7: bisheriger Kreislauf eines Holzwerkstoffes und zukünftig mit eigenen Ergänzungen (in grün) (Bundessamt für Umwelt, 2020)]

Aufgrund abweichender Abmessungen und verfügbarer bzw. geforderter Holzqualitäten kommt es bei der stofflichen Nachnutzung von Altholz (i.d.R. jedoch noch nicht von Abrissgebäuden) in der Regel zu einem Down-Cyclingprozess, bei dem das Produkt stufenweise auf ein niedrigeres Qualitätsniveau herabgesetzt wird (Bsp.: Vollholz – OSB-Platte – MDF-Platte – energetische Verwertung). Diese Kaskadennutzung verfolgt das Ziel, die Holzprodukte möglichst lange auf einem hohen Qua-

litätsniveau zu halten und große Abwärtsschritte zu vermeiden. Dem gegenüber steht die energetische Verwertung, bei der Holzabfälle aufgrund ihres hohen Brennwertes unmittelbar verbrannt werden. Dabei wird Kohlenstoff, der in der Wachstumsphase im Holz gespeicherte wurde, in gasförmiger und klimaschädlicher Form freigesetzt. Das Ziel sollte es jedoch sein, den gebundenen Kohlenstoff, durch eine stoffliche Wiederverwendung, möglichst lange zu konservieren, um das Treibhausgas langfristig der Atmosphäre zu entziehen.

### 2.1.2 Ökobilanz

Die nachfolgenden Diagramme zeigen unter Konzentration auf den nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand (PE ne) und das Treibhauspotential (GWP) einen rechnerischen Vergleich unterschiedlicher Holzwerkstoffe. Er berücksichtigt die im Material gespeicherte Energie, die erst in einem End-of-Life Szenario der thermischen Verwertung wieder freigesetzt wird. Holzbauteile weisen damit eine sehr gute energetische Lebensbilanz auf und fungieren zudem in den hier betrachteten Zeiträumen als CO<sub>2</sub> Speicher, was zu negativen Emissionswerten im GWP-Potential führt. Untersucht wurden insgesamt 30 verschiedene Materialien, von denen hier die besten 12 dargestellt werden. Diese können für die wesentlichen Konstruktionen des Gebäudes hinsichtlich Außenfassade, Innenausbau Dach und Decke verwendet werden.

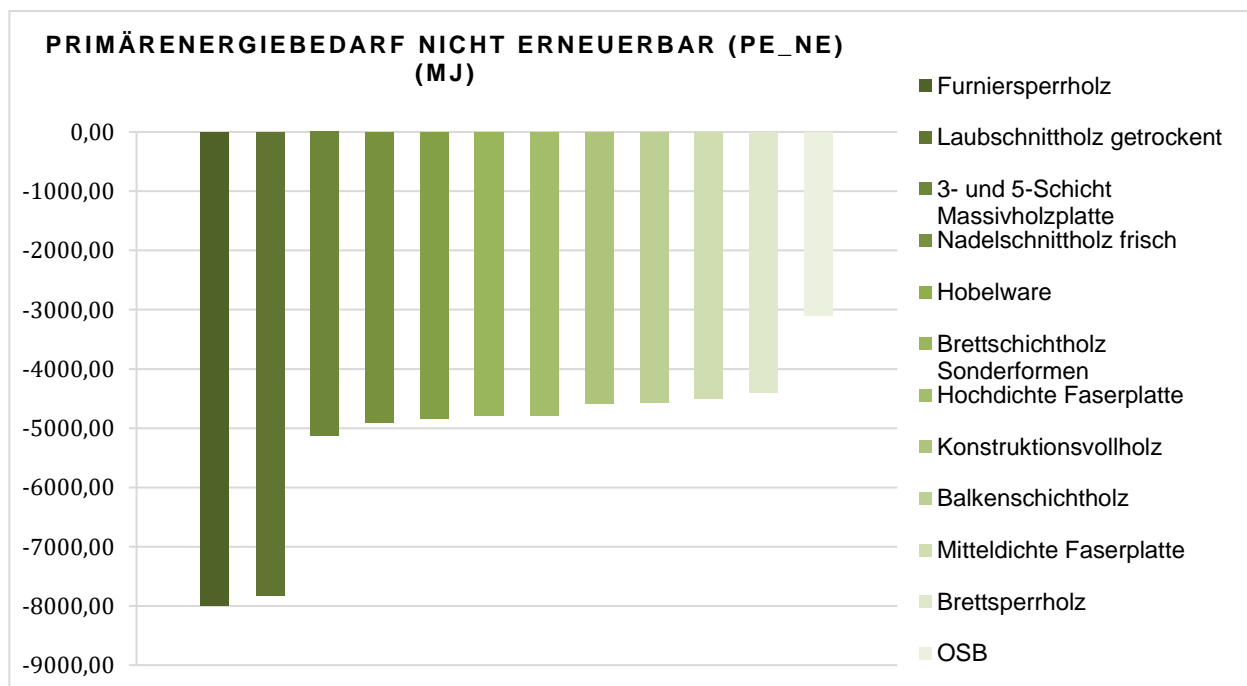


Abbildung A3.8: Vergleich unterschiedlicher Holzwerkstoffe in Bezug auf PE n.e.

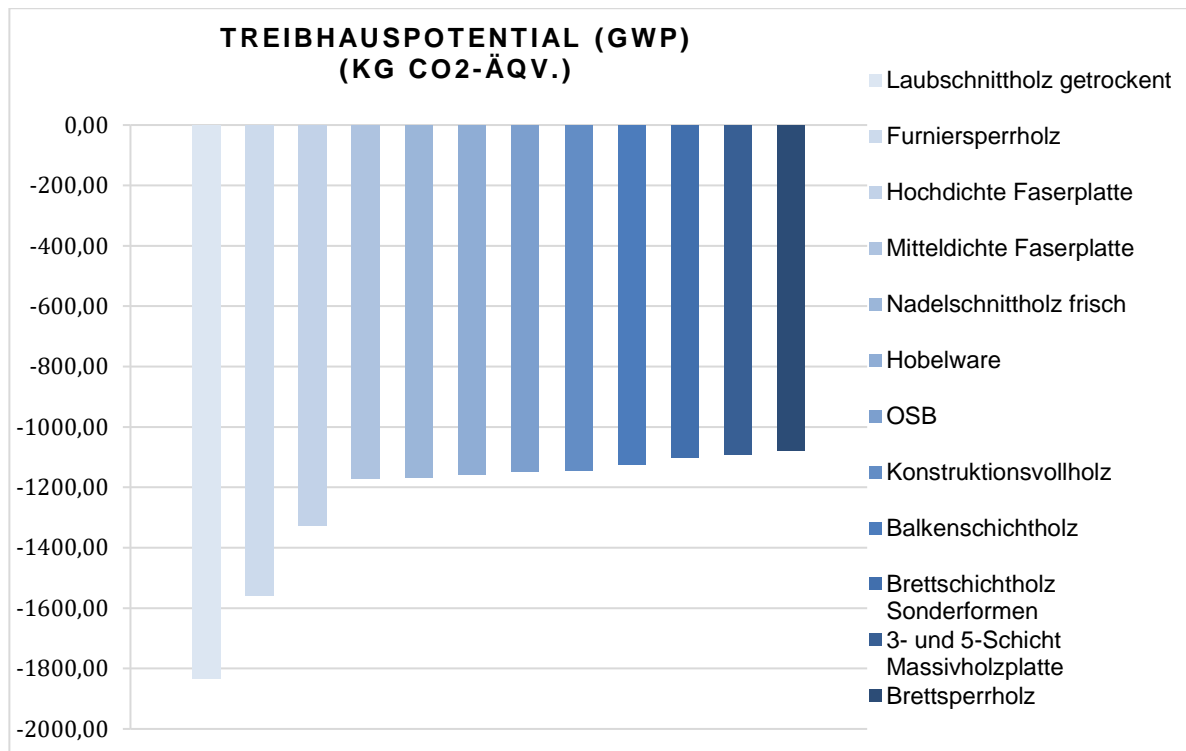


Abbildung A3.9: Vergleich unterschiedlicher Holzwerkstoffe in Bezug auf GWP

## 2.2 Beton

Beton setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen: Zement, Wasser und Zuschlag.

Zement wiederum wird aus Kalkmergel gewonnen, der in Deutschland in vielen Gebieten vorhanden ist. Weitere Bestandteile (an einem Portland-Zement) sind Sand, Tone und Erze, sowie Zugaben von Asche oder Hüttensand, die je nach Zementsorte variieren.

Zur Herstellung wird das Rohmaterial im Tagebau abgebaut, zum Zementwerk transportiert und dort zunächst homogenisiert. Die so definierte Ausgangsmasse wird mehrfach gebrochen und gemahlen, bevor es in mehreren Stufen erwärmt und mit bis zu 1450°C gebrannt wird. Hierbei verbindet sich der Kalk chemisch mit den Zugabestoffen und setzt dabei in großem Umfang CO<sub>2</sub> frei.

In Deutschland wurden 2018 insgesamt 33.6 Mio.t Zement hergestellt. Hierbei wurden ca. 28,8 Mio t CO<sub>2</sub> freigesetzt, von denen ca. 55-60% chemisch bzw. materialbedingt sind: Im Rahmen des Brennvorganges wird bei der Entsäuerung des Kalksteins CO<sub>2</sub> emittiert, um die gewünschten Zementklinker zu erhalten. Die übrigen 45-40% der Emission entstehen energiebedingt, um die erforderlichen Temperaturen im Drehbrennofen zu erreichen. Die Herstellung von Beton verursacht einen ausschlaggebenden Ausstoß von CO<sub>2</sub>. Die weltweite Herstellung von Zement stößt jährlich mehr CO<sub>2</sub> aus, als der weltweite Flugverkehr.



Abbildung A3.10: Kalkabbau zur Zementherstellung bei Erwitte [VH]



Abbildung A3.11: Zementklinker nach dem Brennen

Nach dem Brennen liegt der Zement als sog. Zementklinker vor. Die im Drehofen verschmolzenen Teilchen werden zugunsten einer gleichbleibenden Qualität erneut gemischt und müssen wieder gemahlen werden, bevor sie in den Handel kommen.

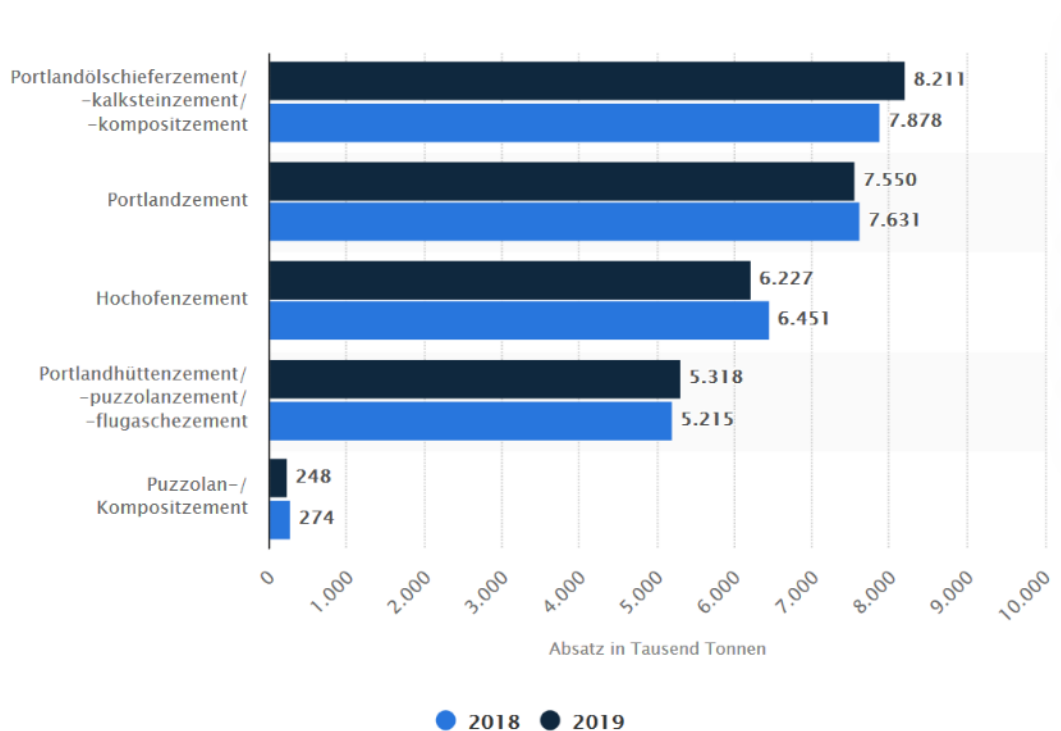


Abbildung A3.12: Marktanteile verschiedener Zementsorten (in 1000 Tonnen) (Statista, 2020)

Seit 2015 erlebt der deutsche Zementmarkt zudem einen deutlichen Aufwärtstrend. Wichtigste Abnehmer der deutschen Zementindustrie sind die inländischen Transportbetonhersteller. Auf sie entfielen im Jahr 2018 etwa 56,5 Prozent des inländischen Zementversands der Verein Deutscher Zementwerke-Mitglieder. Im gleichen Zeitraum gingen etwa 21,7 Prozent an Beton-Bauteilhersteller. Die restliche Menge wurde in Form von Sackzement (6,5 Prozent) sowie sonstigem Silozement (15,3 Prozent) geliefert. Insgesamt kam es in den vergangenen Jahren nur zu geringfügigen Verschiebungen der Versandanteile. Lediglich der Zement in Form von Sackware hat in den vergangenen Jahren tendenziell an Bedeutung verloren.

## Wasser

Obwohl Wasser eine wichtige Ressource ist, wird der Wasserverbrauch für Beton an dieser Stelle nicht diskutiert.

## Zuschläge

Die Zuschläge sind das eigentlich tragfähige Stützgerüst eines Betons, der Zement „nur“ das Bindemittel. Ganz grob können die Zuschläge in natürliche (Sand, Kies, Splitt usw.) und künstliche Zuschläge (Blähton, Hüttensand, Ziegelbruch usw.) eingeteilt werden.

Sand ist nach Wasser der zweitwichtigste Rohstoff der modernen Gesellschaft. Als Ausgangsstoff für Mörtel, Betone und mineralische Kleber, ja selbst Lehmbaustoffe ist er für jedes Gebäude notwendig, weit über die Betonanteile hinaus. Allein China hat in den vergangenen drei, vier Jahren so viel Sand und Kies für die Betonproduktion verbraucht, wie die Vereinigten Staaten in mehr als 100 Jahren. Schätzungen zufolge verbraucht das Land etwa 55 bis 58 Prozent der weltweiten Sand- und Kiesproduktion. (Röhrlich, 2020)



Abbildung A3.13: Verbreitung von Bausand und Kies in Deutschland nach (Diel, 2007)

Entsprechend dem Sandbedarf, sind auch Zuschläge eine endliche Ressource. „Konservativen Schätzungen zufolge baut die Menschheit jährlich doppelt so viel ab, wie alle Flüsse der Welt nachliefern“ schreibt Dagmar Röhrlich nach ihren Gesprächen mit dem Karlsruher KIT. (Röhrlich, 2020).

In Deutschland, in dem z.B. jährlich etwa 100 Mio. t Bausand gewonnen werden, sind die Kiesgruben nur bedingt am Limit – neue Flächen sind aber teilweise überbaut und können als Abbaugelände nicht mehr ausgewiesen werden. Aus diesem Grund wurden z.B. im Kreis Höxter bereits Weserkiesgruben der Fa. Oppermann stillgelegt. Ein anderes Beispiel ist das Ruhrgebiet, das aufgrund der Überbauung Bausande aus dem angrenzenden Münsterland oder den Beneluxstaaten importieren muss.

„Grundsätzlich sind Importe keine Alternative, die weiträumig eingesetzt werden kann. Denn die tonnenschwere Last des Sandes macht Transporte per Lkw teuer. Etwa ab einer Entfernung von über 50 Kilometern ist das unwirtschaftlich.“ (Wörrle, 2019)

Für das Bauvorhaben des Freilichtmuseums kann mit den großen Vorkommen in der Senne (z.B. in Augustdorf) allerdings relativ problemlos auf lokale Ressourcen zurückgegriffen werden.

### 2.2.1 Kreislauffähigkeit

Eine Alternative zu den begrenzten natürlichen Vorkommen stellt die Nutzung von Rezyklaten aus Abbruchmaterialien dar. Beton-, Ziegel- oder Mauerwerksbruch kann, sofern er sortenrein vorliegt, gut als Zuschlagsstoff wiederverwertet werden (Abbildung A3.14). Aus diesem Grund muss bereits in der Planung an das End-of-Life – Szenario gedacht werden, um unnötige Einbauten ggf. auch Bewehrung zu vermeiden.



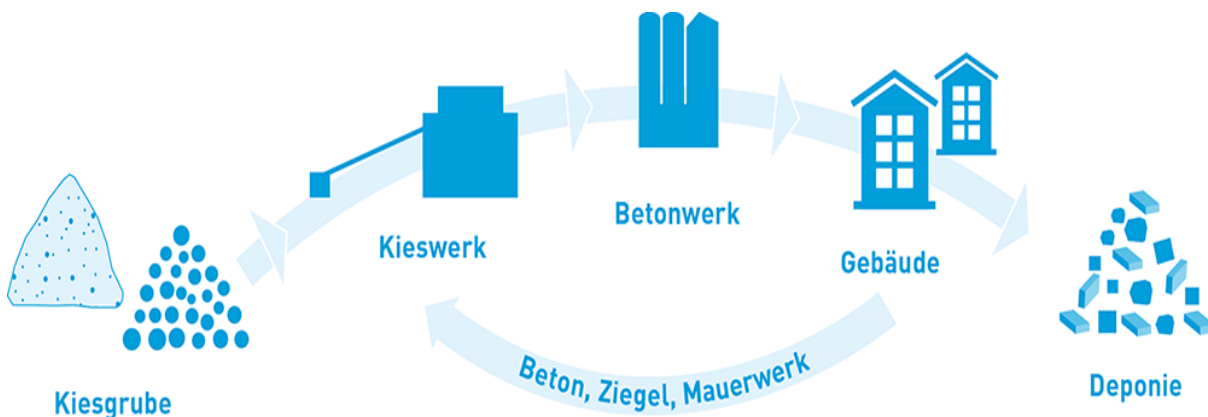


Abbildung A3.14: Kreislauf eines Betonwerkstoffes

Altbeton gibt es in großen Mengen; in Großstädten liegt diese Ressource quasi um die Ecke. Die Qualität heutigen Abrissmaterials ist dabei gut, da momentan viele Gebäude aus den Jahren 1950 bis 1970 abgerissen werden. In diesen Jahren wurde teilweise noch mit reinem Beton (ohne Bewehrungseisen) gebaut, so dass sich das Material sortenrein zurückbauen lässt. Gesteinskörnungen aus Altbeton können dann als Zuschlagstoffe im Recyclingbeton für neue Bauwerke genutzt werden. Voraussetzung ist ein selektiver Rückbau, bei dem die Materialien an der Abbruchstelle sortiert werden. Recycling-Beton, abgekürzt RC- oder auch R-Beton, steckt in bereits in einigen Bauwerken. Vorreiter ist die Schweiz: Aus wiedergewonnenem Material besteht beispielsweise das Schulhaus von Christian Kerez in Zürich-Leutschenbach mit seiner auffallenden Fachwerkkonstruktion im vierten Obergeschoss. Im Rohbau der Ersatzneubauten der Züricher Siedlung Werdwies von Adrian Streich haben die Gesteinskörnungen der Vorgängerbauten aus den 1950er-Jahren an Ort und Stelle ihre neue Verwendung gefunden.

Bei allem ökologischen Charme kann die Verwendung von Recycling-Beton keine grundsätzliche Forderung sein, sondern nur im Einzelfall sinnvoll beschlossen werden. Gibt es zum Beispiel Kies in der näheren Umgebung, kann der Transport und Herstellungsaufwand für den aufbereiteten Zuschlag zu hoch sein. Auch die Entfernung zum Brechwerk, das aus dem Abbruchmaterial die Gesteinskörnungen herstellt, spielt eine Rolle. Mobile Brechwerke an der Abbruchstelle sind nur für große Mengen sinnvoll und wenn es ausreichend Platz auf der Abbruchstelle gibt. Zudem können mobile Brechwerke nicht fein sortieren. Sie machen aber viel Staub und Lärm, was vor allem bei Abbruchstellen in Innerstädten nicht in Frage kommt.

In Betonwerken, in denen Recyclingbeton hergestellt wird, werden die Abläufe an das neue Material angepasst. Die rezyklierten Gesteinskörnungen müssen auf dem Betriebsgelände gesondert gelagert werden. Auch beim Transport muss peinlichst darauf geachtet werden, dass die aus dem Abbruch gewonnenen Gesteinskörnungen sich nicht mit primären Rohstoffen vermischen. Nach der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton ist Recyclingbeton bereits seit mehr als zehn Jahren ein eingeführter und normierter Baustoff (vgl. (DIN206, 2017), (DIN1045, 2008)). Die übliche Zertifizierung und Überwachung einer neuen Rezeptur ist dabei, wenn sie erst einmal in den Ablauf integriert ist, nicht aufwendiger als für herkömmlichen Beton. Sobald das Abbruchmaterial gefunden und für eine erste Probe verarbeitet ist, prüft die zuständige Stelle nach denselben Parametern wie bei beim Primärbeton. Hat das Recyclingmaterial das europataugliche CE-Kennzeichen, kann das Betonwerk die für den Bau berechneten Mengen der erforderlichen Gesteinskörnungen herstellen und die Zuschlagstoffe zu Fertigbeton verarbeiten.

Als Zuschlagstoffe für den Recyclingbeton können die Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 hergestellt werden. In Deutschland wird Recyclingbeton nur mit

einem Anteil von maximal 45 Prozent rezyklierten Gesteinskörnungen verbaut. Die Rezepturen bleiben im Wesentlichen dieselben wie beim Beton mit Zuschlagstoffen aus primären Rohstoffen. Für den umweltverträglichen Recyclingbeton werden grundsätzlich die gleichen Eigenschaften beschrieben wie für Primärbeton. Nur für Bauteile aus Spann- oder Leichtbeton hat der Recyclingbeton keine Zulassung.

### 2.2.2 Ökobilanz

In der Ökobilanz des Verbundmaterials Beton werden die einzelnen Baustoffe zusammengefasst. Für die nachfolgende Optimierung wurden die einzelnen Bestandteile separiert und in entsprechenden Varianten verglichen. Dabei beschränkt sich die Betrachtung auf die Kategorien A1-3, da nicht für alle Materialien Daten z.B. zu A4 vorlagen oder angenommen wurden. Während der Nutzungsphase entstehen durch Beton keine Umweltwirkungen (entsprechend kein Impact in Kategorie B). Zum jetzigen Zeitpunkt können auch noch keine Aussagen zur Entsorgung der jeweiligen Materialkombinationen gemacht werden, weswegen auch dieser Bereich ausgeblendet wird. Hiermit wird im Prinzip unterstellt, dass für alle Materialien ähnliche Entsorgungsszenarien möglich sind.

Ziel der Betrachtung ist, wie am ganzen Gebäude, die Optimierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz, hier zunächst auf der Materialebene des Verbundwerkstoffes Stahlbeton. In dieser Wirkkategorie dominiert in einem Standardbeton das Bindemittel Zement, welches für annähernd 2/3 der klimaschädlichen Emissionen verantwortlich ist. Wenig überraschend folgt der Bewehrungsstahl (hier angenommen mit 1 Vol %) und schließlich der Zuschlag, der zwar die Massenbilanz bestimmt, aber tatsächlich mit vergleichsweise geringem Aufwand gewonnen und eingebaut werden kann (Abbildung A3.15). Vor diesem Hintergrund wurde der Zement schnell als Ziel einer Optimierung identifiziert.

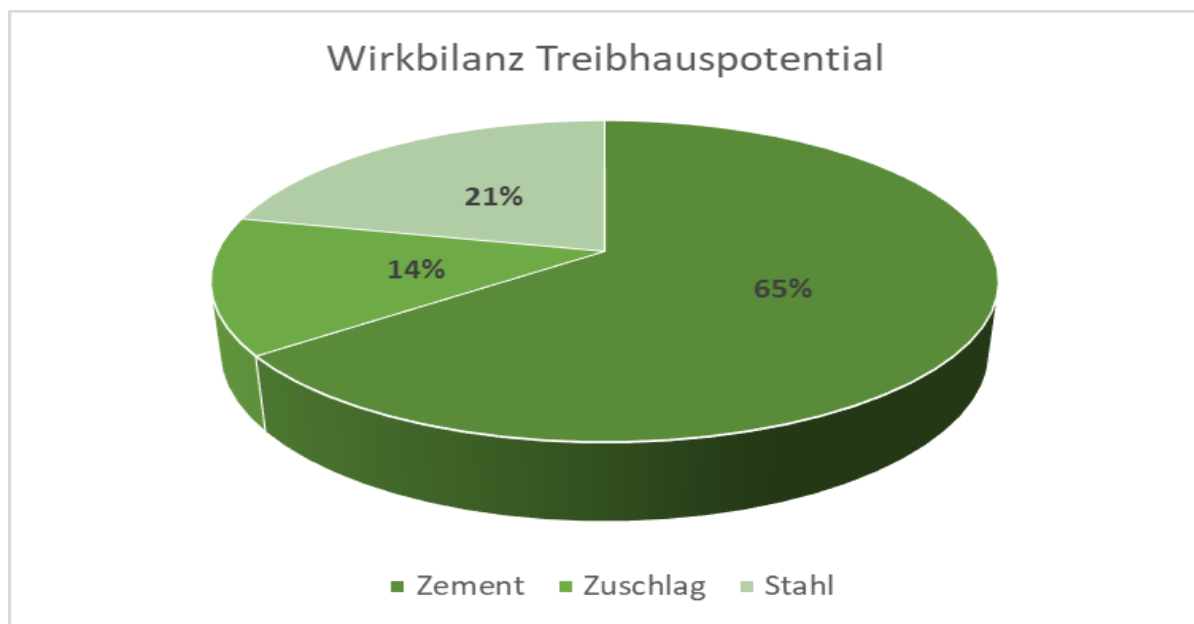


Abbildung A3.15: Aufteilung der klimarelevanten Emissionen (GWP) für einen Kubikmeter Standardbeton C25/30

Bundesweit werden verschiedene Strategien zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen verfolgt und ausgetestet (vgl. Kap. 1.2.). Sehr wirkungsvoll und ergänzend sollte die Ökobilanz auch mit einfachen Verdrängungskörpern verbessert werden können. In der Variantenbetrachtung wird in der Stoffraumrechnung zunächst der normale Zement durch einen klimafreundlicheren Zement ersetzt. Forschungsergebnisse am IBMB der TU- Braunschweig haben gezeigt, dass die Betoneigenschaften in Bezug auf Druckfestigkeit usw. hierbei erhalten bleiben können (IBMB, 2016). Im nächsten Schritt

wird der Beton teilweise durch Hohlkörper verdrängt. Im Unterschied zum Bauen mit dem sog. Ökobeton handelt es sich hierbei um eine bereits bauaufsichtlich zugelassene Bauweise. Die Hohlkörper bestehen aus recyceltem Polyethylen, welches in Ermangelung einer eigenen EPD über das Modul PE-Rohr (KRV, 2001) bilanziert wurde.

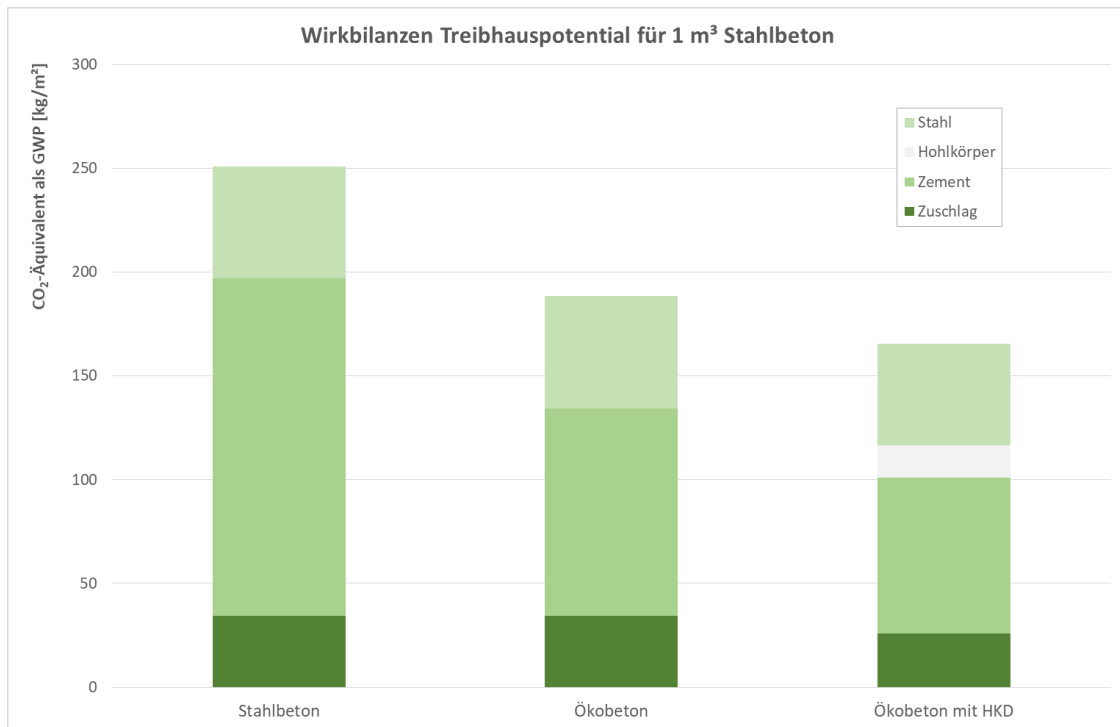


Abbildung A3.16: Vergleichende GWP- Betrachtung am Beispiel von 1 m³ Stahlbeton

Im Ergebnis zeigt sich zunächst für den Ökobeton eine mind. 25%ige Einsparung im Treibhauspotential. Hohl- oder Verdrängungskörper führen zu einer weiteren Verbesserung, allerdings erhöht der eingebrachte Kunststoff den ökologischen Fußabdruck, obwohl es sich um Recyclingmaterial handelt. Dies wurde hier im zweiten Lebenszyklus mit der Hälfte des Herstellungsaufwandes angesetzt, was aber sicher diskutiert werden kann. Mit diesem Ansatz werden die Vorteile, die durch den vermiedenen Beton in Zuschlag und Zement erzielt werden, zum Teil wieder verrechnet und in Summe kann eine 35%ige Einsparung im Vergleich zum konventionellen Standardbeton festgestellt werden.

Die energetische Wirkungsbilanz des Ökobetones kann hier noch nicht dargestellt werden, da die Datengrundlage noch nicht gesichert vorliegt. Sie muss in weiteren Untersuchungen und in Abhängigkeit von der genauen Rezeptur noch erarbeitet werden. Auf Grundlage der vorhandenen Datenbasis zu den Hohlkörperdecken lässt sich jedoch schon absehen, dass die Kunststoffe, auch wenn sie nur in geringen Materialstärken eingebracht werden, einen großen Rucksack an nicht erneuerbarer Energie mitbringen, der die Ökobilanz ungünstig beeinflusst.

Notwendig sind weitere Schritte zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks von Betonbaustoffen: Neben der Optimierung des Materiales selber (Bindemittel und Zuschlag!) liegt ein großes Potential in der Substitution des Materiales durch Bauweisen wie Leichtbeton, Hohlkörperdecken oder Kassetten-Decken. Grundsätzlich ist auch eine ökologische Verbesserung des Betones durch die Verwendung von rezyklierten Zuschlägen möglich – aber zum einen ist deren Einfluss auf die Wirkbilanz mit 14 % nicht sehr groß, zum anderen muss die ggf. anstehende Zulassung im Einzelfall auch thematisch nicht überfrachtet werden.

Die Beachtung der Regionalität ist im vorliegenden Projekt kein Problem, da ausreichende und lokale Ressourcen verfügbar sind – dies gilt aber nicht für jeden Standort (Beispiel: Berlin/ Ruhrgebiet).

## 2.3 Lehm

Der Baustoff Lehm erfüllt die Vorgaben der Nachhaltigkeit in vielerlei Hinsicht: Seine Herstellung ist extrem unaufwändig: in Deutschland wird er im Tagebau/ in Gruben maschinell abgebaut und je nach Erfordernis unter Zugabe von Wasser, Gesteinsmehl und ggf. Naturfasern (z.B. Stroh) zu einem Bauprodukt verarbeitet. Da keine künstlichen Inhaltsstoffe benötigt und während des Produktionsverfahrens keine entsprechenden Stoffe freigesetzt werden, gelten Lehmbaustoffe als nicht umweltgefährdend. Reste aus der Produktion können entweder dem Produktionskreislauf erneut zugeführt oder der Natur zurückgegeben werden. Weder während der Herstellung noch in der Verarbeitung werden schädliche Substanzen benötigt, so dass auch das eingebaute Material jederzeit wiedereingesetzt oder zurückgeführt werden kann. Echte Lehmbaustoffe besitzen darüber hinaus auch den Vorteil, dass sie eine sehr lange Lebensdauer haben, offiziell dürfen bei der Ökobilanz von Lehmbaustoffen annähernd 100 Jahre angenommen werden.

### 2.3.1 Kreislauffähigkeit

Dies ist möglich, da der erhärtete Lehm in seiner reinen Form unter der Zugabe von Wasser replastifiziert und ohne Qualitätsverlust recycelt werden kann. Durch ein Aufschwämmen werden die Kapillarkraftbindungen zwischen den verschiedengroßen Korngrößen aufgelöst und das Grobkorn von den tonhaltigen Agglomeraten, dem Bindemittel, getrennt. Dadurch wird zudem ermöglicht, dass sich der Lehm rückstandslos von anderen Bau- und Störstoffen, wie beispielsweise Beton lösen lässt. So kann das Material ohne großen Energieaufwand wiederverwendet oder wieder Teil des Bodens werden, aus dem der Lehm entnommen wurde. Aus diesen Gründen soll Lehm möglichst nicht mit chemischen Zusatzmitteln, wie hydraulische Bindemitteln, vermischt werden.

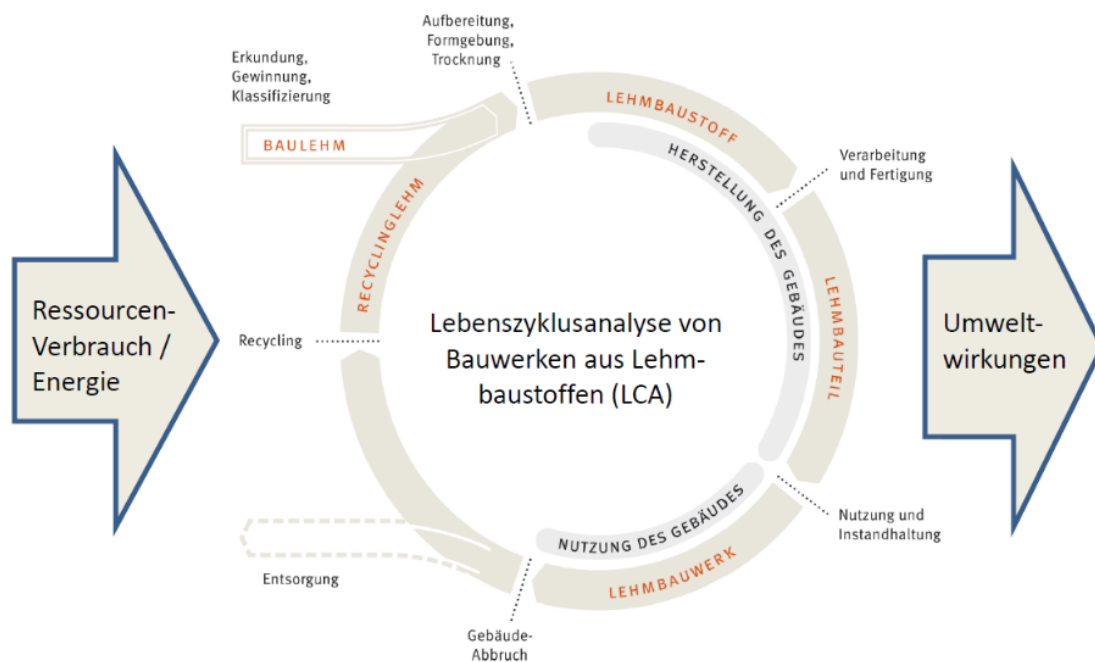


Abbildung A3.17: Lebenszyklus von Bauwerken aus Lehmbaustoffen nach (Dachverband Lehm e.V., 2018)

Wird diese Forderung eingehalten, bzw. wenn die zugegebenen Stoffe wieder aus dem Lehmgemisch lösbar sind, so ist eine hohe bis vollständige Wiederaufbereitung möglich. Lehmstoffe können hierbei auf dem Qualitätsniveau ihrer Anwendung bleiben, ein Downcycling wie bei Holz oder Beton ist nicht notwendig.

### 2.3.2 Ökobilanz

Aufgrund der wenig aufwändigen Herstellung haben die meisten lehm-basierten Baustoffe günstige Werte in der Ökobilanz. Abbildung A3.18 zeigt die Werte für die erneuerbare und nicht-erneuerbare Primärenergie sowie das Treibhauspotential für je 1 kg Material. Im internen Vergleich der Lehm-baustoffe weisen Lehmputz und Stampflehmwende die niedrigsten Werte auf, diese Werkstoffe müssen für die Nutzung nicht extra aufbereitet werden. Dagegen zeigen Lehm- bauplatten und Lehm- ziegel/-steine in den vorliegenden Datensätzen einen deutlichen Energiebedarf Für die Fertigung. Bei der Lehm- bauplatte sind hierfür u.a. mechanische Schritte der Fertigung wie pumpen, walzen, Trocknungs- und Schneidvorgänge sowie nicht zuletzt die eingelegte Fasermatte verantwortlich. Bei der Ziegelherstellung werden Prozesse des Formens und der Trocknung eingerechnet.

Gleichzeitig zeigt sich z.B. beim Lehmputz anhand der 2018 von der DBU geförderten Muster EPD zur Lehmputzen (Dachverband Lehm e.V., 2018) das im Detail auch noch deutliches Verbesserungspotential in der Datenqualität und in den Produktionsabläufen steckt. Hiernach sind durch veränderte Prozessketten auch Lehmputze möglich, die ca. Faktor 6 unter dem Wert nach Ökobaudat liegen (z.B. 0,23 MJ/kg für einen mit erneuerbaren Energien getrockneten Lehm-binder statt 1,07 für den Datensatz nach Ökobaudat; Abbildung A3.18). Für alle Lehmbaumaterialien kann damit das Trocknen oder Brennen als ein energietreibender Faktor identifiziert werden. Erdfeucht verarbeitete Lehm- baustoffe sind bilanztechnisch günstiger verschieben aber aufgrund der höheren Masse einen Teil dieser Bilanz in die Transporte zur Baustelle (A4), welche in den Datenbanken für Lehm bei- spielsweise nicht enthalten ist. Es bleibt abzuwarten, inwieweit diese Randbedingungen im Projekt- verlauf beeinflusst werden können – und ob man dann in einer Bilanzierung die realen Herstellungsbedingungen zugrunde legt – und nicht mehr vergleichbar zu standardisierten Verfahr- ren ist.

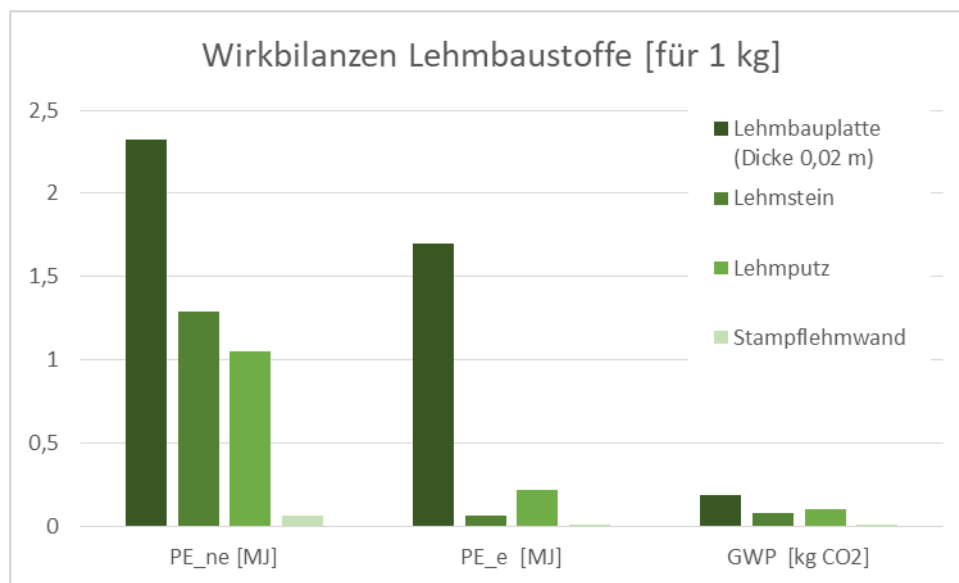


Abbildung A3.18: Wirkbilanzen für verschiedene Lehm- baustoffe nach Ökobau. dat

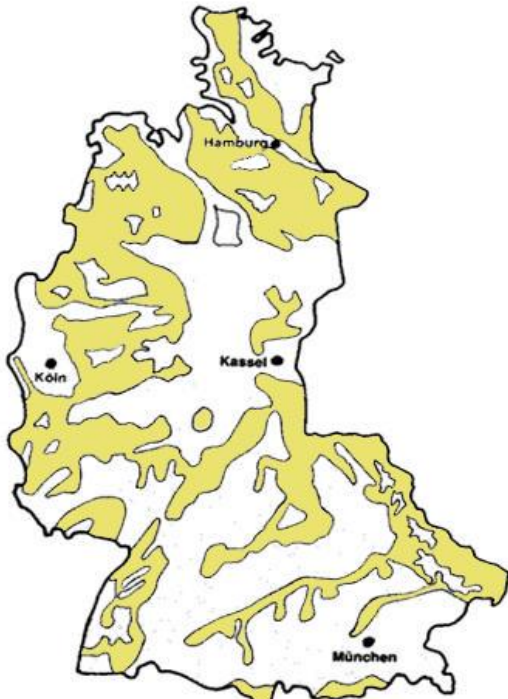


Abbildung A3.19: Lehmvorkommen in Deutschland nach

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

Karte zu erkennen ist, gibt es nur am Alpenrand, in den Mittelgebirgen, in der Mittelrheinsenke, und in sandreichen Heidegebieten geringere Lehmvorkommen (Abbildung A3.19).

Vieles zum Material ist auch schon in den vorangehenden Kapitel gesagt worden, weswegen hier die vielfältigen Aspekte zur Nachhaltigkeit von Lehmstoffen nicht wiederholt werden.

Bei einer Rohdichte von ca. 2000 kg/m<sup>3</sup> können die Transporte die ökologischen Vorteile eines Materials, speziell bei insgesamt niedrigen Umweltauswirkungen schnell zunichtemachen. In den EPDs zu Lehmpulver, Lehmbausteinen oder Lehmbauplatten sind keine Transporte zur Baustelle enthalten, diese können (und sollen) individuell berücksichtigt und ausgestaltet werden können.

Im vorliegenden Projekt steht Lehm in hervorragender Weise zur Verfügung. Mit Conluto steht in nur 16 km Entfernung ein kompetenter und in Deutschland führender Hersteller für Lehmstoffe zur Verfügung. Dieser hat zudem auch Zugang zu eigenen und regionalen Lehm – Vorkommen.

Deutschlandweit stehen flächendeckend Lehmvorkommen für Baulehm zur Verfügung. Wie in der

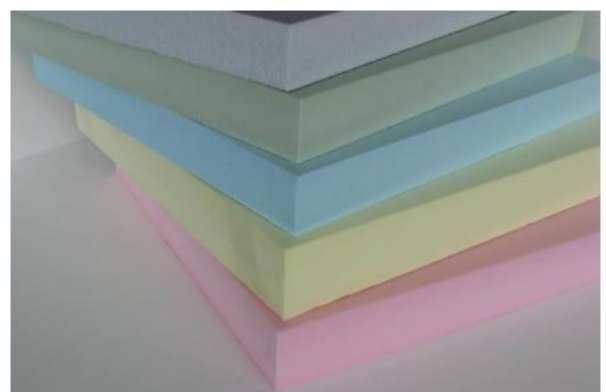
## 2.4 Dämmstoffe



Mineralwolle



EPS-Dämmung (Styropor)



Schaumglasplatten



XPS Dämmung



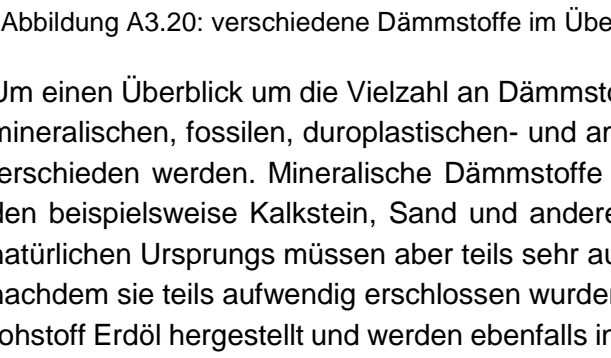
Holzfaserplatten



Phenolharzschaum



Schilfrohr /Thypha



Calciumsilikatplatten

Abbildung A3.20: verschiedene Dämmstoffe im Überblick [Bilder überwiegend vom FIW, Dr. Andreas Holm]

Um einen Überblick um die Vielzahl an Dämmstoffen zu erhalten (Abbildung A3.20) muss zwischen mineralischen, fossilen, duroplastischen- und aminoplastischen sowie biotischen Dämmstoffen unterschieden werden. Mineralische Dämmstoffe werden aus abiotischen Rohstoffen hergestellt zu den beispielsweise Kalkstein, Sand und andere Mineralien gehören. Die Ausgangsrohstoffe sind natürlichen Ursprungs müssen aber teils sehr aufwendig zu Dämmstoffen weiterverarbeitet werden nachdem sie teils aufwendig erschlossen wurden. Fossile Dämmstoffe werden aus dem Ausgangsrohstoff Erdöl hergestellt und werden ebenfalls intensiv weiterverarbeitet, um aus ihnen Dämmstoffe zu generieren. Duroplastische- und aminoplastische Dämmstoffe gehören zu der Gruppe der Kunststoffe und werden in verschiedenen Verfahrenen synthetisiert. Biotische Dämmstoffe werden aus nachwachsenden organischen Vorkommen wie verschiedenen Pflanzen und Hölzern hergestellt, diese Dämmstoffe sind die natürlichsten und erfordern einen geringeren technischen Aufwand in der Herstellung und der Gewinnung als mineralische, fossile oder duroplastische / aminoplastische Dämmstoffe.

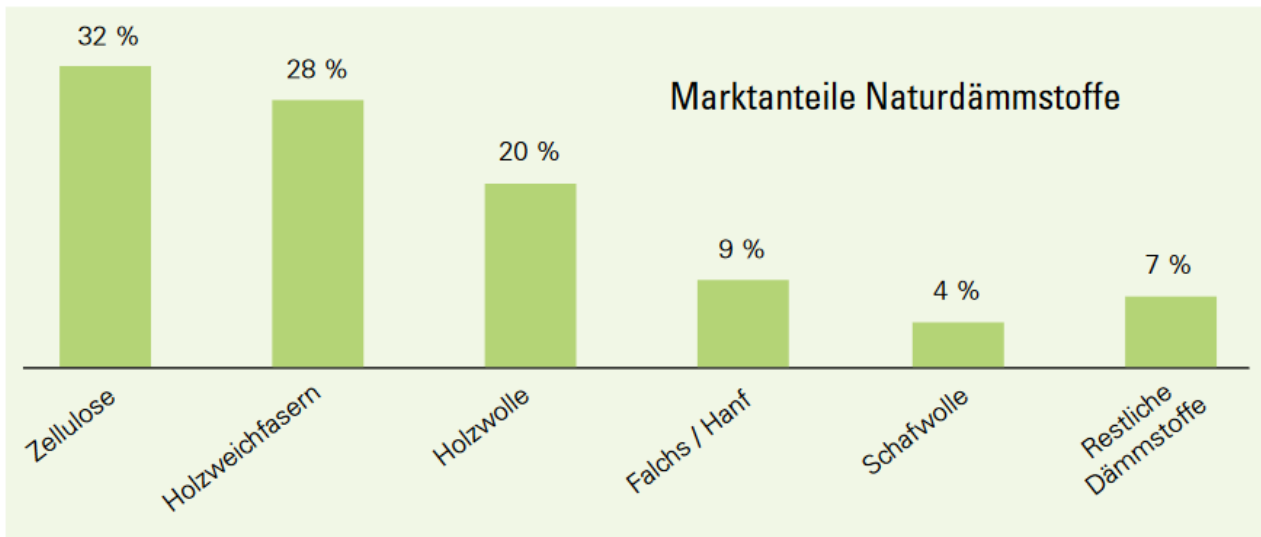


Abbildung A3.21: Marktanteile von Naturdämmstoffen nach Angaben der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Die folgenden Vergleiche der nichterneuerbaren Primärenergie, der erneuerbaren Primärenergie und des Treibhauspotentials diverser Dämmstoffe bezieht sich auf 1m<sup>3</sup> der Dämmung, (dabei kann das Gewicht des Volumens stark schwanken).

Der Vergleich der nichterneuerbaren Primärenergie (Abbildung A3.22 zeigt ein wichtiges Faktum zur energetischen Berechnung von pflanzlichen Stoffen auf. Die Werte sind sehr hoch, da die Energie die zur Herstellung, der Photosynthese (Wachstum) der Ausgangsrohstoffe nötig ist, dort mit einfließt. Diese können zeitgleich durch die Pflanzung (nachwachsend) neuer Ausgangsrohstoffe (Pflanzen) ausgeglichen werden. Dies ist ein Vorteil, den die anderen Dämmstoffe trotz ihrer niedrigen Werte nicht in sich tragen.

Trotz der guten Werte biotischer Dämmstoffe können sie aufgrund von Anforderungen wie z.B. dem Feuchtigkeitsschutz nicht in allen Bereichen verwendet werden. Beispiele sind Bodenplatten oder erdberührenden Außenwänden. Hier sollten abiotische Dämmstoffe verwendet werden, die den Anforderungen gerecht werden und dennoch relativ schonende Umwelteinflüsse haben oder sich hervorragend wiederverwenden lassen.



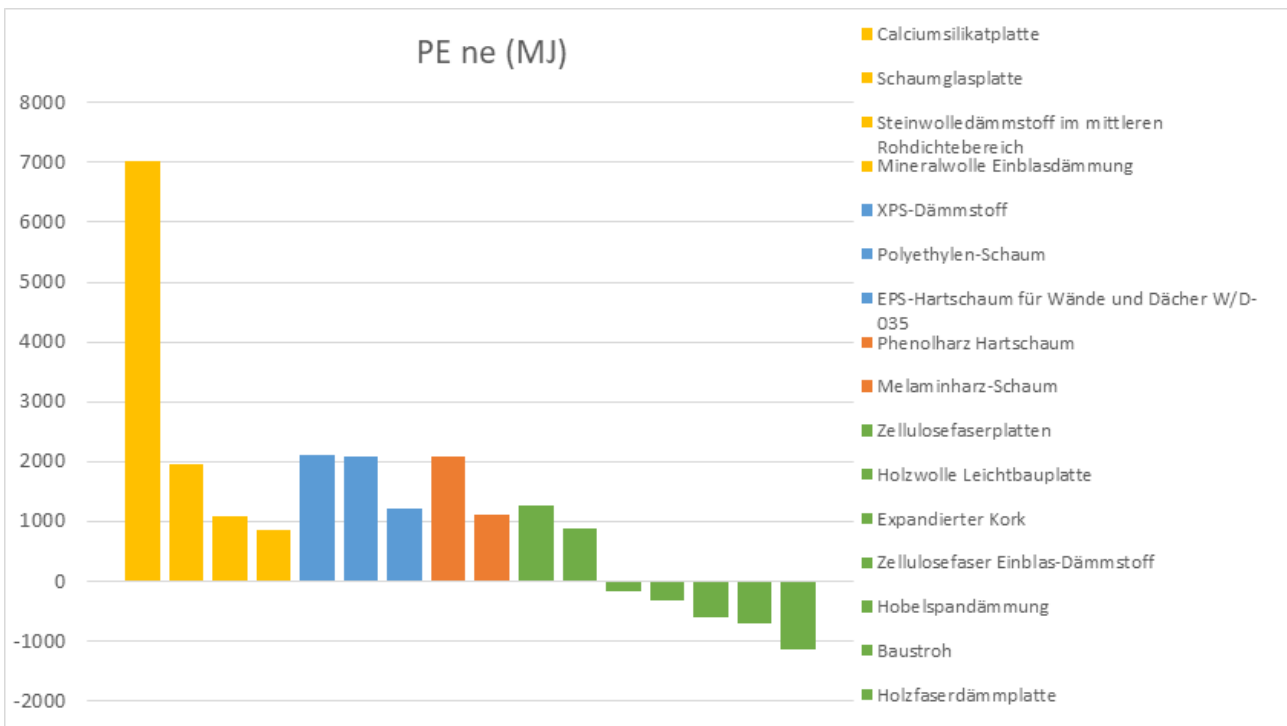


Abbildung A3.22: Vergleich der nichterneuerbaren Primärenergie mineralischer (gelb), fossiler (blau), künstlicher (orange) und biotischer (grün) Dämmstoffe

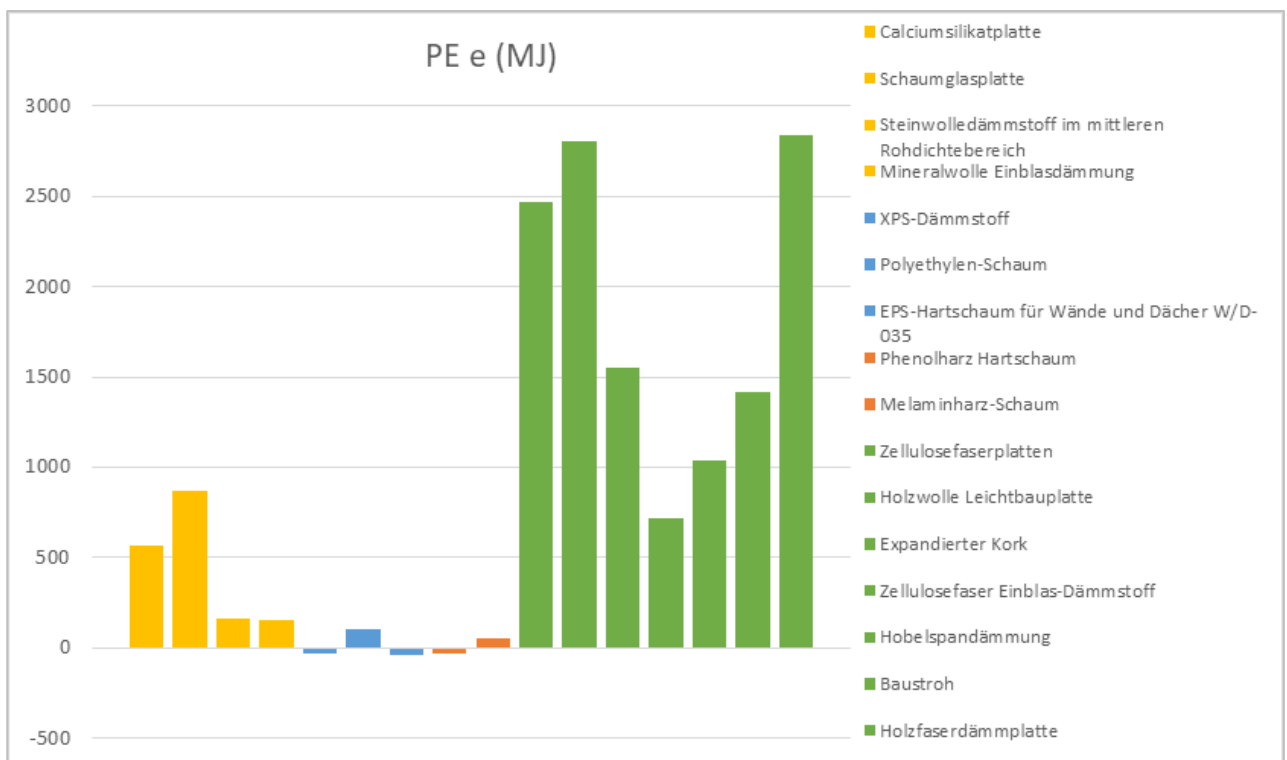


Abbildung A3.23: Vergleich der erneuerbaren Primärenergie mineralischer (gelb), fossiler (blau), künstlicher (orange) und biotischer (grün) Dämmstoffe

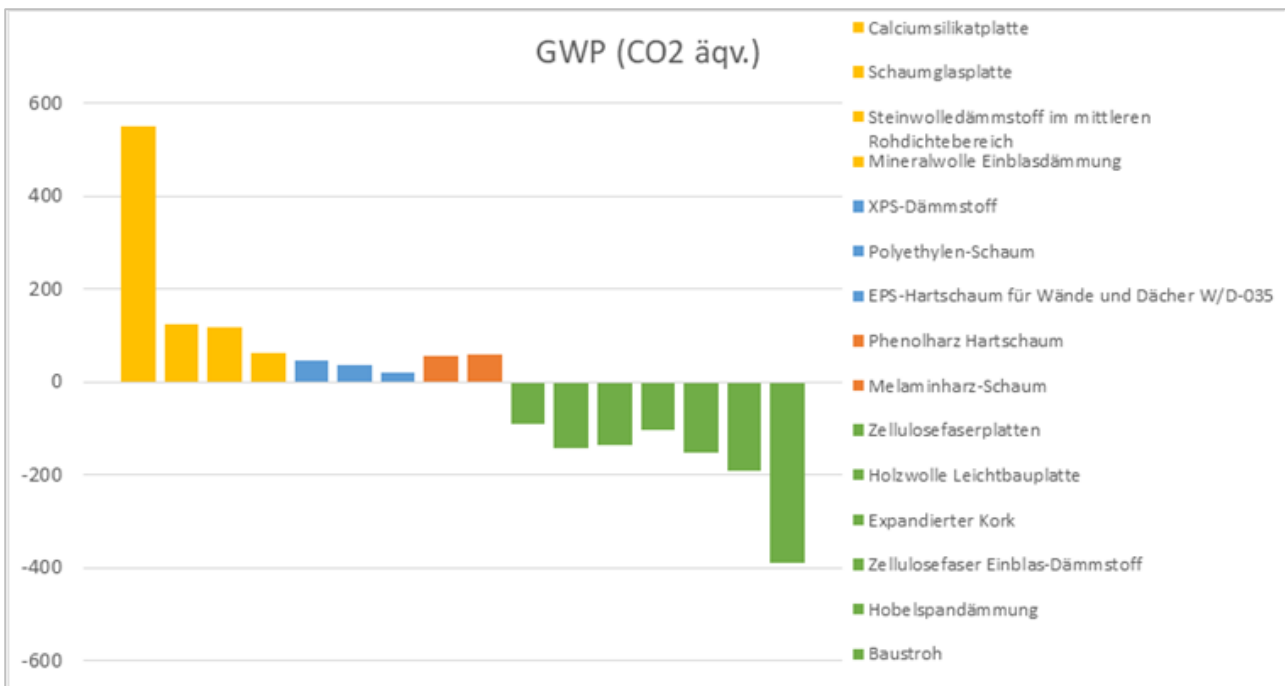
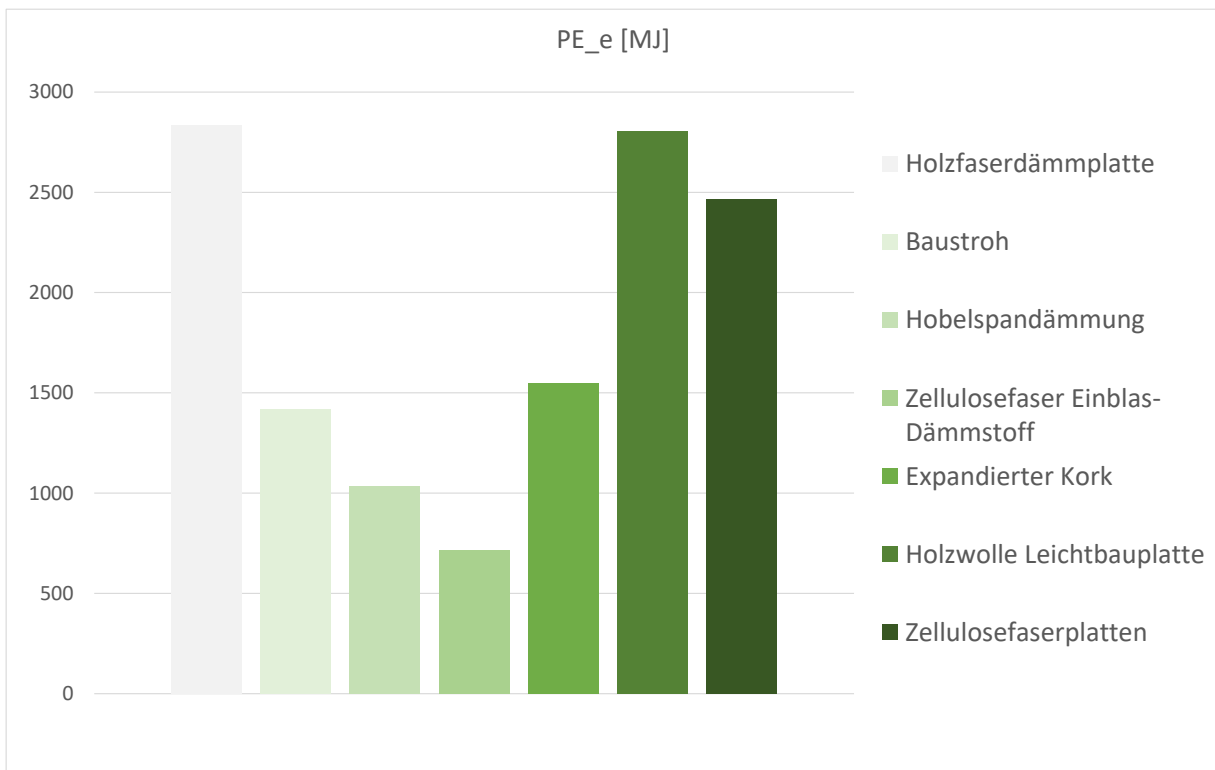
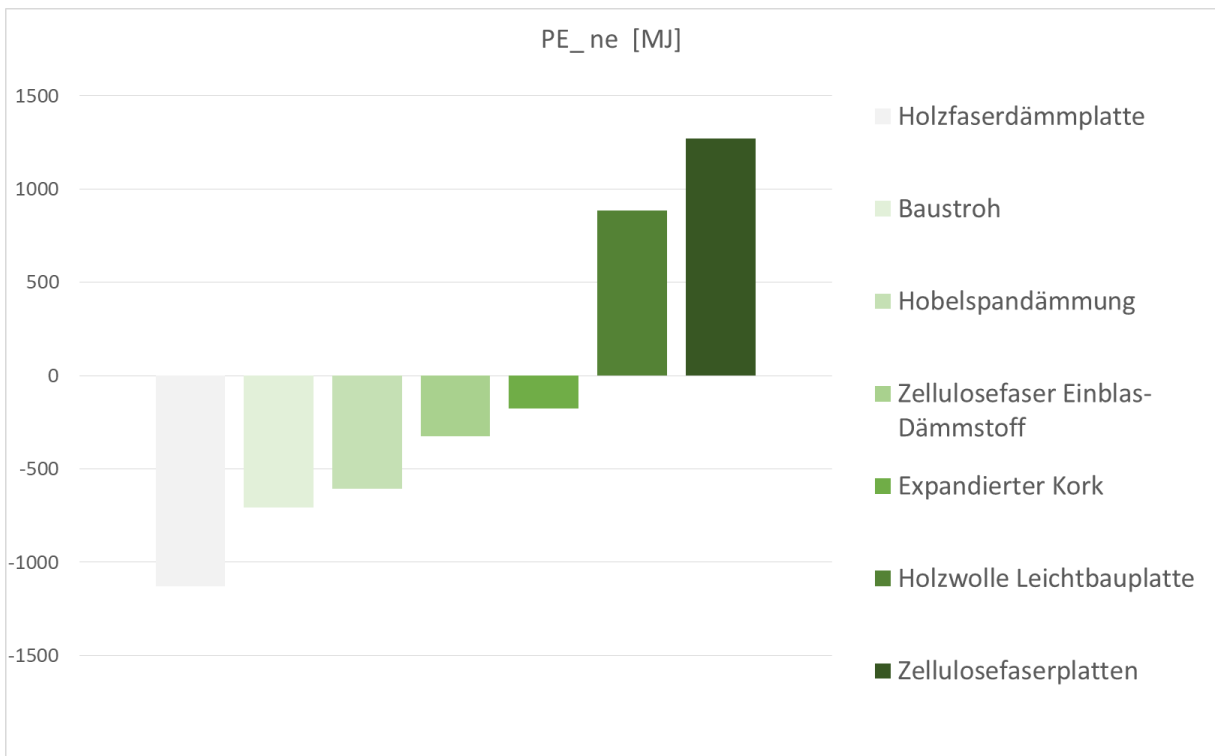


Abbildung A3.24: Vergleich des CO<sub>2</sub> Äquivalents mineralischer (gelb), fossiler (blau), künstlicher (orange) und biotischer (grün) Dämmstoffe

In der vergleichenden Betrachtung des Treibhauspotentials (Abbildung A3.24) ist der grundlegende Vorteil biotischer Dämmstoffe abzulesen: Das in dem pflanzlichen Material eingelagerte und durch die Photosynthese der Atmosphäre entzogene CO<sub>2</sub> wird in den Dämmstoffen eingelagert. Führt man diesen Gedanken fort, könnten die für Gebäude verwendeten Dämmstoffe wie Speicher einer der Atmosphäre CO<sub>2</sub>-entziehenden, natürlichen Maschinerie gesehen werden. Mineralische, fossile und künstliche Dämmstoffe hingegen emittieren CO<sub>2</sub> in erheblichen Maßen.

In den Vergleichen wird deutlich, welche Vorteile die biotischen Dämmstoffe in der Betrachtung ihrer Potentiale auf die Umwelt bieten. Im Folgenden werden die biotischen Dämmstoffe noch einmal separat im direkten Vergleich betrachtet:



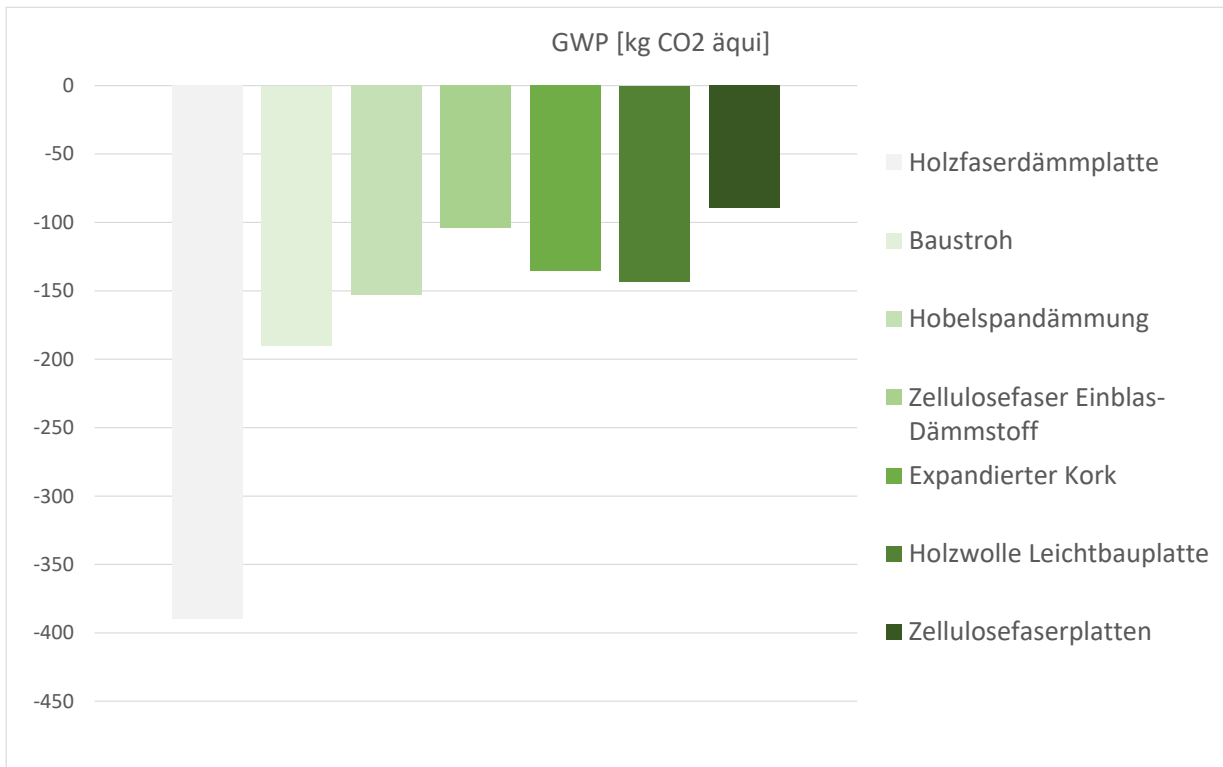


Abbildung A3.25: Vergleich der Ökobilanzdaten für nachwachsende Dämmstoffe

## 2.5 Ausbaustoffe

### 2.5.1 Fußbodenbeläge

Bei ca. 3100 m<sup>2</sup> Nutzfläche lässt sich auch über die Wahl des richtigen Bodenbelages ein ökologischer Effekt erzielen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden verschiedene, bauübliche Bodenbeläge miteinander verglichen werden, um je nach Anforderung und architektonischen Vorstellungen ein geeignetes Material auswählen zu können. Die hier präsentierte Auswahl, die sich aktuell von einer Pflasterung (auch im Innenraum möglich) über verschiedene Rollwaren bis hin zu Holzwerkstoffen oder Massivholz zieht, ist aktuell ohne Rücksicht auf innenräumliche Anforderungen zusammengestellt, um eine möglichst breite Entscheidungsbasis zu bieten. Gemeinsam ist jedoch allen Belägen eine gewisse Robustheit, so dass grundsätzlich ein Einsatz in belasteten oder öffentlichen Bereichen denkbar wäre. Zugrunde gelegt wurden handelsübliche Materialstärken.

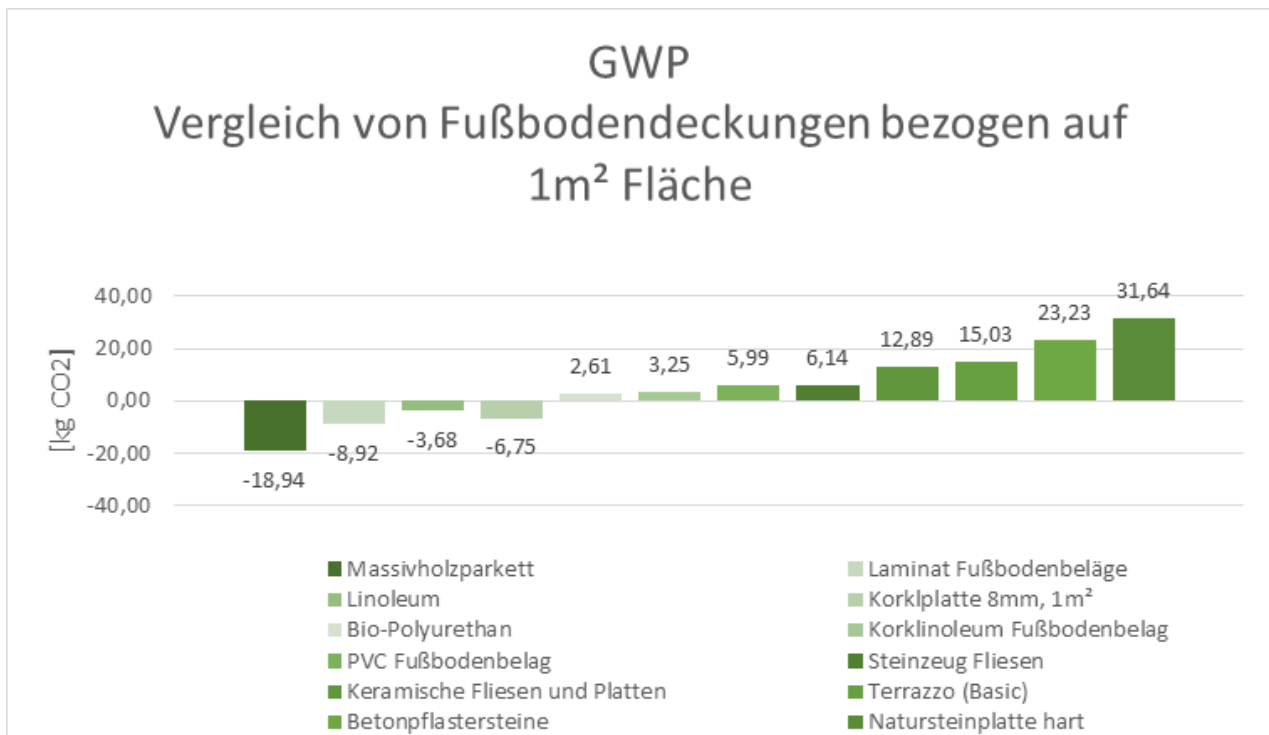


Abbildung A3.26: Vergleich vom Treibhauspotential Bodenbelägen

Im Ergebnis ist festzustellen, dass z.B. der Einsatz eines Massivholzparkett den ökologischen Gedanken des Hauses nicht nur in der Materialität, sondern auch im ökologischen Fußabdruck sehr gut entspricht. Deswegen, und wegen seiner sehr guten hygroskopischen Eigenschaften wurde dieses Material schon in einem frühen Stadium als Bodenbelag für die Ausstellung und Depotbereiche empfohlen. Abhängig von der Versiegelung kann Massivholz als Bodenbelag eine feuchte-puffernde Wirkung auf das Raumklima haben. Ein schönes Beispiel aus dem Museumsbereich findet sich in der Mathildenhöhe in Darmstadt, wo 10 cm starkes Stirnholzparkett zum Einsatz gekommen ist. Weniger aufwändig und damit z.B. auch billiger ist etwa 2cm starkes Industrie- Stabparkett, welches z.B. in der Solarfabrik für die Fa. Solvis (*Arch. Banz und Riecks, Bochum*) in Braunschweig umgesetzt wurde.



Abbildung A3.27: Hirnholzparkett  
[ohne Bildquelle]

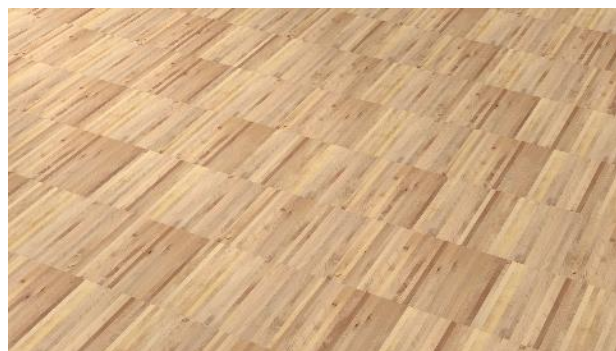


Abbildung A3.28: Industriestabparkett  
[ohne Bildquelle]

## 2.5.2 Bekleidung und Beplankung

Der Vergleich verschiedener Plattenwerkstoffe liefert Hinweise für die spätere Ausgestaltung von Leichtbauwänden, Vorsatzschalen oder Bekleidungen im Dach und Deckenbereich. Ergebnisoffen wurden hier die verschiedenen, im Baubereich üblichen Platten zunächst unabhängig vom späteren

Einsatzgebiet betrachtet- auf diese Weise kann eine Entscheidungshilfe für den Architekten gegeben werden, der in Bezug auf die konkrete Aufgabe und Konstruktion nach der ökologischsten Lösung sucht.

Im Ergebnis sind, soweit möglich, Holzwerkstoffe als Bekleidungen und Beplankungen den mineralischen Varianten einer Lehm- oder Gipsbauplatte vorzuziehen. Diese haben jedoch den Vorteil, dass sie Brandschutzvorgaben und evtl. auch akustische Anforderungen besser erfüllen, so dass bei entsprechenden Anforderungen diese Konstruktionsarten gewählt werden müssen. Dies sollte im weiteren Projektverlauf noch detaillierter und differenzierter betrachtet werden.

Bei Bekleidungen mit Holzwerkstoffen kommt zudem noch der ästhetische Aspekt der Plattenstöße hinzu: Während bei den mineralischen Bekleidungen in der Regel die Stöße/Fugen verspachtelt und ggf. sogar noch einmal geschliffen werden, damit eine glatte, malerfertige Oberfläche entsteht, zeigen Oberflächen aus Holzwerkstoffen oftmals geringe Fertigungstoleranzen, die zu deutlich sichtbaren Plattenstößen führen. Diese sollten also gezielt inszeniert werden oder erlauben dann doch „nur“ den Einsatz des Materiales in einer Hybridbauweise bei zweilagigem Aufbau -in dem die Holzbauplatte die untere Lage bildet, während z.B. eine Lehmbauplatte raumseitig eingesetzt wird und verspachtelt werden kann. Ein großer Vorteil hier ist, z.B. die Lastaufnahme durch die hintere Lage zu sehen, in der Aufhängungen (z.B. Bilder o.ä.) besser befestigt werden können.

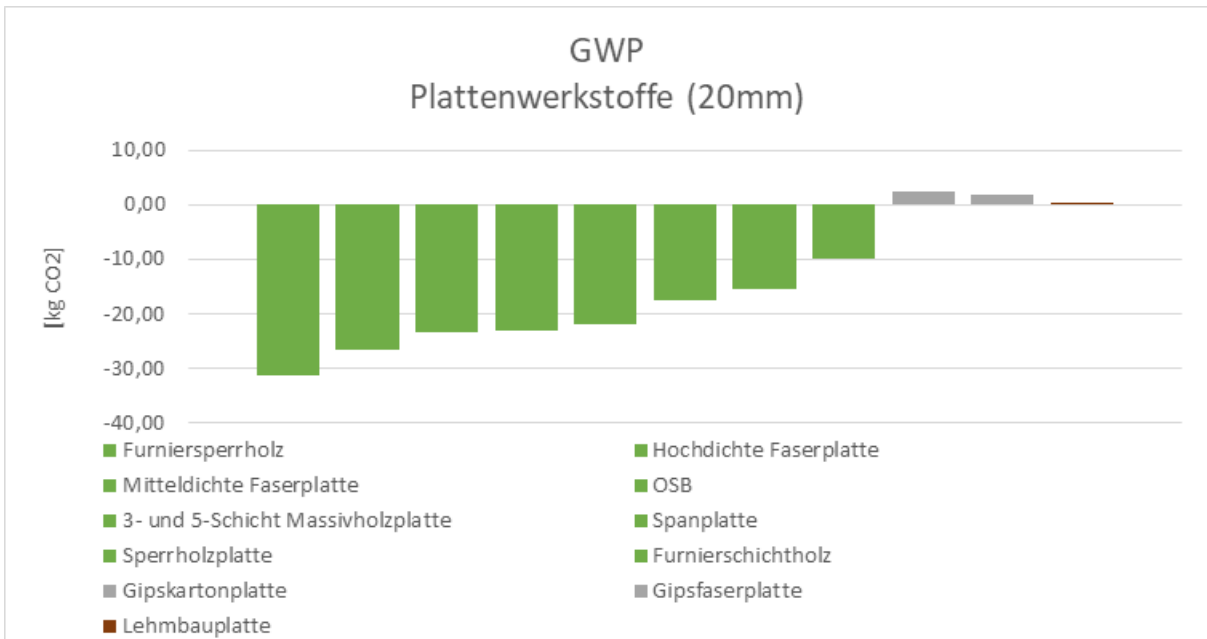
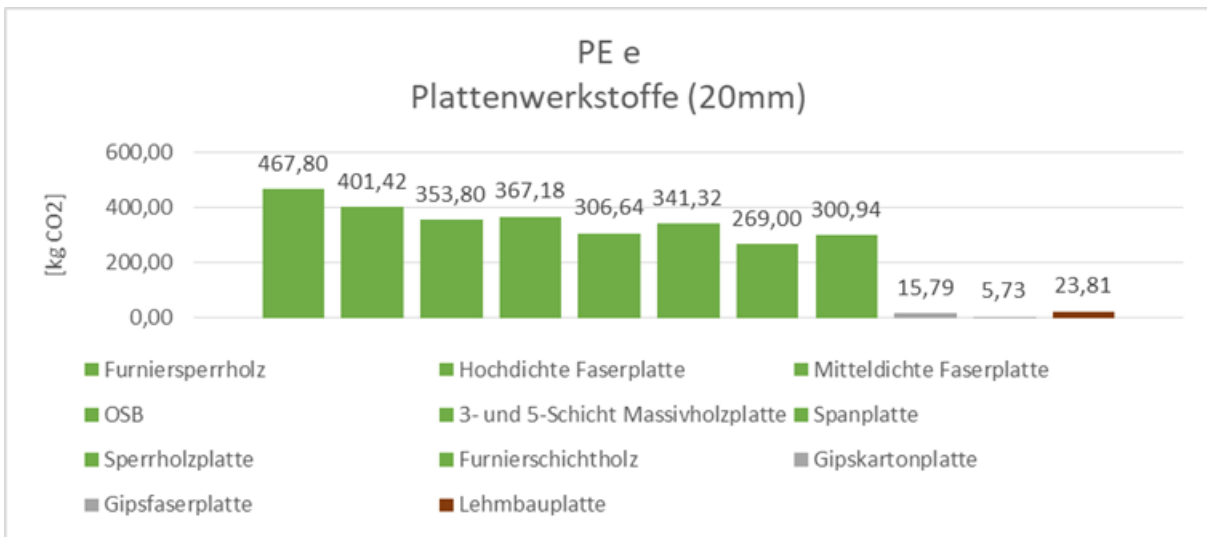
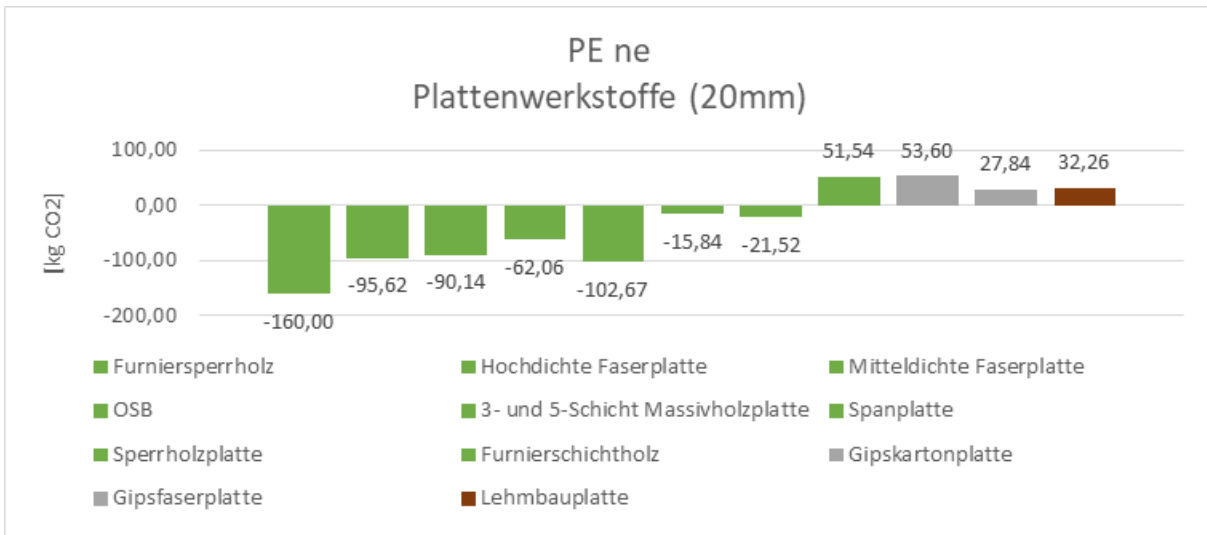


Abbildung A3.29: Ökologische Vergleich Plattenwerkstoffe

### 2.5.3 Putze

Wie bereits im Hauptteil des Berichtes aufgeführt und im letzten Abschnitt noch einmal herausgestellt, erfüllen natürliche Materialien wie Holz oder eine sichtbare Stampflehm-Oberfläche oftmals nicht die Anforderungen an eine moderne Museumswand. Aus diesem Grund werden im Folgenden typische Innenputze in ihren Wirkebenen Primärenergie- Bilanz und Treibhauspotential verglichen.

Aktuell wird der Ausstellungsraum von einer Stampflehmwand dominiert- entsprechend ist hier ein Lehmfeinputz zu betrachten. Dieser findet sich als Datensatz in der Ökobau-Datenbank. Lehmputze werden üblicherweise mit einer Materialstärke von ca. 2 cm aufgebracht und können sehr fein geglättet und anschließend mit Lehmfarben wunschgemäß angestrichen werden (die Anstriche wurden hier nicht bilanziert). Weitaus typischer für Wandputze sind Gipsputze, Kalk-Gips-Putze oder Kalkputze, die allerdings in der Regel alle ebenfalls farblich nachbehandelt werden. Bei allen Farben ist im Museum immer auf die Ausdünstungen zu achten. Der Verzicht auf Konservierungs- und Lösungsmittel schützt in diesem Fall nicht nur die Menschen, sondern auch die ausgestellten, oft an der Wand befestigten und grundsätzlich empfindlichen Exponate.

Ähnlich wie Lehmputze sind Kalkputze sind bereits seit über tausend Jahren bekannt und verbreitet. Aufgrund ihrer Flexibilität im Einsatz (Kalkputze können innen und außen und auf fast jeder Oberfläche eingesetzt werden) haben sie sich in den letzten Jahrhunderten in Deutschland sogar stärker verbreitet als die Lehmputze. Aufgrund der alkalischen Eigenschaften sind sie ein schlechter Nährboden für Schimmel, Flechten oder Algen und wurden aus diesem Grund nicht nur in Wohnräume eingesetzt, sondern auch in Kellern oder Stallungen. Kalkputze stehen in der öffentlichen Wahrnehmung entsprechend für ein gutes hygienisches Raumklima. Ausgangsmaterial ist im Tagebau abgebauter Kalkstein, der durch Brennen reaktiv gemacht wird. Durch maximale Offenporigkeit wirken reine Kalkputze und Kalkfarben im Innenbereich raumklimatisierend. Feuchtigkeitsspitzen werden gut gepuffert und Gerüche schnell neutralisiert.

Gipsputze überzeugen durch ihre feine Körnung und hohe Haftkraft beim Auftrag. Ähnlich wie Lehmputze mit hohem Schluff-Anteil lässt sich ein Gipsputz hervorragend glatt abziehen. Gipsputze sind wasserlöslich und können deswegen nur im Innenraum und besser nicht in Nasszellen eingesetzt werden. Ausgangsmaterial sind heute zu 60% REA- Gipse, die als Abfallprodukt der Rauch-Gas-Entschwefelung aus Industriebetrieben und Kohlekraftwerken anfallen und zu 40% Naturgipse, die im Tagebau abgebaut werden. Durch die geplante Abschaltung deutscher Kohlekraftwerke wird der Anteil der REA Gipse zukünftig zurückgehen. Der dargestellte Gipsputz bezieht sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf einen Naturgips, der in der Prozesskette gebrochen und gewaschen wurde.

Die Putze werden daher alle für eine Materialstärke von zwei Zentimetern und eine Bezugsfläche von einem Quadratmeter dargestellt und verglichen.

Im Ergebnis schneidet der Lehmputz am besten ab, dicht gefolgt von einem reinen Kalkputz. Hierbei überraschen die Ergebnisse etwas: während das günstige Abschneiden des Lehmes aufgrund seiner einfachen Herstellung erklärbar ist, müsste ein Gipsputz, vor allem unter Berücksichtigung von REA-Gipsen eigentlich niedrigere Umweltauswirkungen zeigen. Auch in den Brenntemperaturen sollte sich ein Effekt zeigen – während Gips sein Kristallwasser bereits ab 150°C abgibt, werden Kalke im Bereich von 400-900° C gebrannt – vielleicht ein Grund für die höheren CO<sub>2</sub>-Werte. Hoffentlich nicht berücksichtigt sind die während des Brennens abgegebenen Kohlendioxid-Anteile – diese werden nämlich vom Kalk während des Erhärtens wieder aufgenommen...



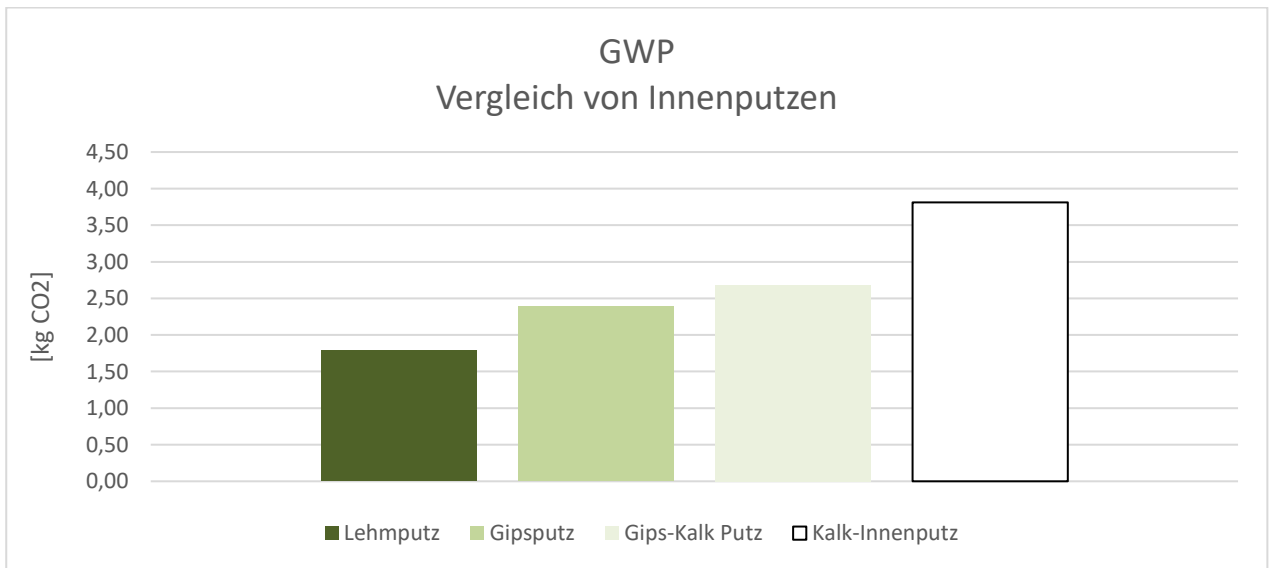
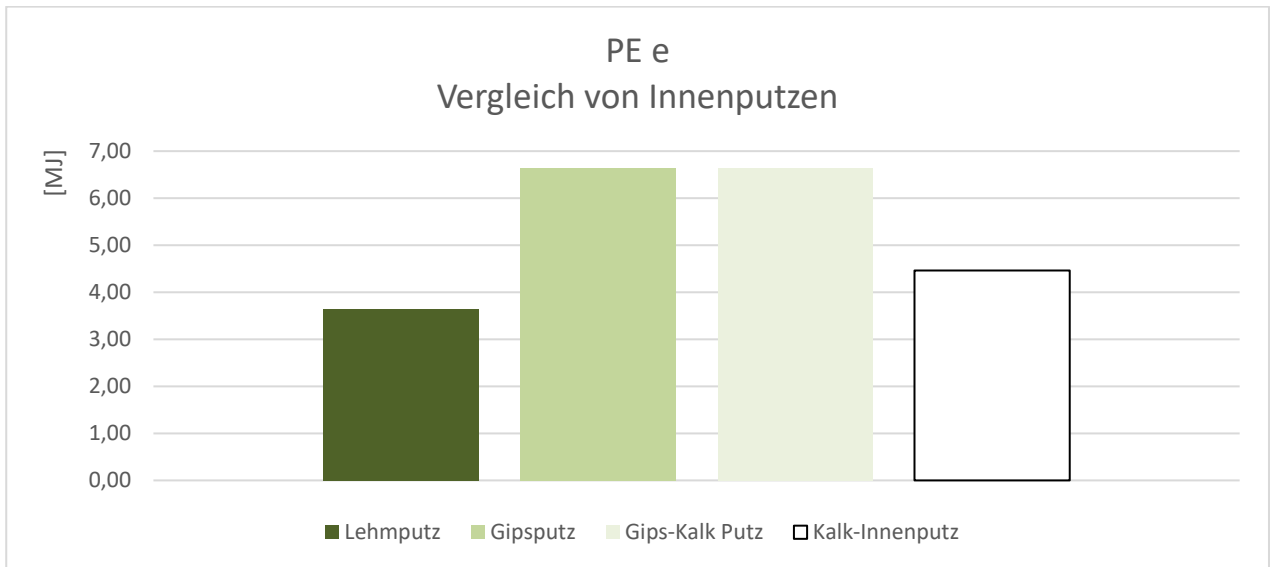
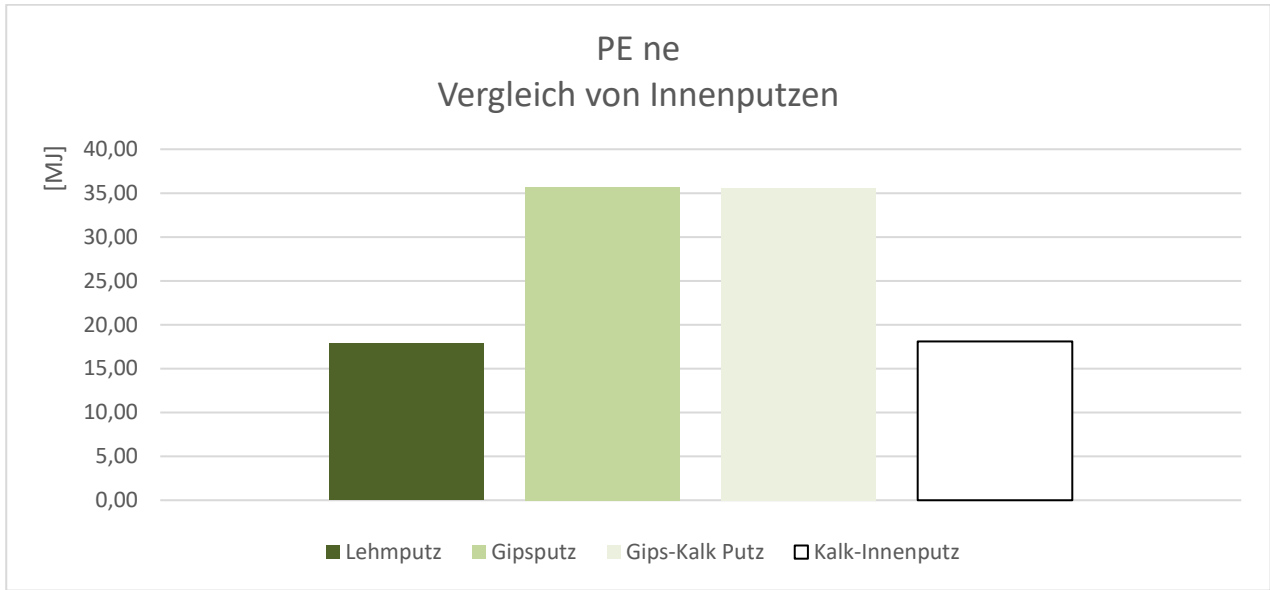


Abbildung A3.30: Ökologischer Vergleich von Innenputzen

Prinzipiell können alle Putzmörtel abhängig von ihrem Sandanteil relativ einfach wieder aufbereitet werden und erneut als Mörtel verwendet werden. Ähnlich wie ein Lehmputz können Putze mit nicht hydraulischen Bindemittel einfach zerkleinert und neu eingeweicht werden, während ein hydraulischer Kalkmörtel neu gebrochen, gemahlen und sicherlich neu gebrannt werden sollte.

Grundsätzlich sind aber im hier diskutierten Kontext Lehm- und Kalkputze zur Umsetzung zu empfehlen.

### **3 Bauteile:**

#### **3.1 Bodenplatte**

Für die Bodenplatte wurden drei Varianten untersucht: Zunächst die konventionelle Stahlbetonsohle aus Beton mit einer flächigen Perimeterdämmung aus extrudiertem Polysterol. Dann eine ökologisch optimierte Variante mit dem bereits vorgestellten Ökobeton, Beton also, der mit einem Bindemittel hergestellt wurde, das während der Herstellung weniger CO<sub>2</sub> Emissionen emittiert. In der nächsten Variante soll das Volumen des Betons durch Verdrängungskörper reduziert werden. Dieses Prinzip der sog. Hohlkörper ist aus dem Bereich von Decken bekannt, verbreitet und besitzt eine bauaufsichtliche Zulassung. Firmen wie Cobiax oder UNIDOME bieten entsprechende Einsätze aus recycelten Kunststoffen an. Diese reduzieren durch die Verdrängung von Beton das Eigengewicht des Bauteiles und machen so größere Spannweiten bei freitragenden Decken möglich. Bei geringerem Eigengewicht wird gleichzeitig der Materialeinsatz an Beton und Stahl reduziert, was in der Theorie zu Einsparungen in allen Wirkungskategorien der Ökobilanz führt. In diesem Fall soll das Prinzip abseits des Üblichen auf eine Bodenplatte übertragen werden, wo zwar Spannweiten keine Rolle spielen, aber man sich den Effekt der Materialersparnis zur Verbesserung der Ökologie zu Nutze machen kann.

Im Vergleich zeigt sich zunächst eine Einsparung in allen hier betrachteten Kriterien für die Variante mit Ökobeton. Die Hohlkörper aus recyceltem Polypropylen führen jedoch tatsächlich zu einer Verschlechterung der Wirkungsbilanz (vgl. auch Kap. Beton), vor allem im Bereich der nicht erneuerbaren Energien.

So lässt sich mit dem Ökobeton auch bei der Bodenplatte ca. 20% an kritischem CO<sub>2</sub> Ausstoß einsparen. Die Berücksichtigung der Hohlkörper führt in der Emissionsbilanz zu einer Einsparung an Treibhausgasen in der Größenordnung von ca. 35 %. In der Betrachtung der (wenig gesicherten!; s.a. Erläuterungen im Kap. Beton) primärenergetischen Werte kommt es jedoch mit den eingesetzten Hohlkörpern trotz des reduzierten Betonvolumens und eines reduzierten Anteiles an Bewehrungsstahl zu einem erhöhten PE ne Bedarf. Mögliche Optimierungswege liegen in der Überprüfung des Rechenansatzes in der Bilanz sowie ggf. bei einer anderen Materialwahl für die Verdrängungskörper. Statisch bietet die Bodenplatte eher gute Voraussetzungen für eine Betonsubstitution.

Dennoch wird hier für den Moment mit einem einfachen, unverdrängten Ökobeton weitergerechnet, und dies aktuell auch für die weitere Planung empfohlen – die Option von Verdrängungskörpern wird in den weiteren Projektverlauf mitgenommen.

Tabelle A3.1: Zusammenstellung Wirkbilanz der Sohlplatte

<p><b>Bauteil Bodenplatte</b></p> <p>U-Wert : 0,19 W/m²K</p>	 <p>① Bodenplatte</p>																					
<p><b>PE ne (MJ)</b></p>  <p>Legend:          ■ Bodenplatte konventionell          ■ Bodenplatte Ökobeton          ■ Bodenplatte Ökobeton + HKD</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bodenplatte konventionell</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Konstruktionsaufbau</td> <td></td> </tr> <tr> <td>200 mm</td> <td>Perimeterdämmung</td> <td>955</td> </tr> <tr> <td>250 mm</td> <td>Stahlbeton C25/30</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>116</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>111</td> </tr> </tbody> </table>	Bodenplatte konventionell		PE ne	Konstruktionsaufbau			200 mm	Perimeterdämmung	955	250 mm	Stahlbeton C25/30	PE e			116			GWP			111
Bodenplatte konventionell		PE ne																				
Konstruktionsaufbau																						
200 mm	Perimeterdämmung	955																				
250 mm	Stahlbeton C25/30	PE e																				
		116																				
		GWP																				
		111																				
<p><b>PE e (MJ)</b></p>  <p>Legend:          ■ Bodenplatte konventionell          ■ Bodenplatte Ökobeton          ■ Bodenplatte Ökobeton + HKD</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bodenplatte Ökobeton</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Konstruktionsaufbau</td> <td></td> </tr> <tr> <td>380mm</td> <td>Schaumglasschotter</td> <td>626</td> </tr> <tr> <td>250mm</td> <td>Ökobeton C25/30</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>135</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>49</td> </tr> </tbody> </table>	Bodenplatte Ökobeton		PE ne	Konstruktionsaufbau			380mm	Schaumglasschotter	626	250mm	Ökobeton C25/30	PE e			135			GWP			49
Bodenplatte Ökobeton		PE ne																				
Konstruktionsaufbau																						
380mm	Schaumglasschotter	626																				
250mm	Ökobeton C25/30	PE e																				
		135																				
		GWP																				
		49																				
<p><b>GWP (CO2 äqv.)</b></p>  <p>Legend:          ■ Bodenplatte konventionell          ■ Bodenplatte Ökobeton          ■ Bodenplatte Ökobeton + HKD</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bodenplatte konventionell</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Konstruktionsaufbau</td> <td></td> </tr> <tr> <td>200 mm</td> <td>Perimeterdämmung</td> <td>955</td> </tr> <tr> <td>250 mm</td> <td>Stahlbeton C25/30</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>116</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>111</td> </tr> </tbody> </table>	Bodenplatte konventionell		PE ne	Konstruktionsaufbau			200 mm	Perimeterdämmung	955	250 mm	Stahlbeton C25/30	PE e			116			GWP			111
Bodenplatte konventionell		PE ne																				
Konstruktionsaufbau																						
200 mm	Perimeterdämmung	955																				
250 mm	Stahlbeton C25/30	PE e																				
		116																				
		GWP																				
		111																				

## **Rückbau:**

Betonbauteile können nur „abgerissen“ werden – d.h. dass ein hochfestes Bauteil wieder zerlegt und entfernt werden muss. Nur mit Sägen oder Brechen lassen sich die großformatigen Bauteile zerkleinern, abtransportieren und möglicherweise weiter zerkleinern. Je nach Variante müssen dann auch die einzelnen Elemente in Metalle, Kunststoffkomponenten und Betonbruch getrennt werden. Für den Einsatz von Rezyklat in Verbindung mit Ökozement gibt es aktuell noch Bedenken in Bezug auf die chemische Verträglichkeit – im Umkehrschluss heißt dies, dass auch Betonbruch aus Ökobeton möglicherweise nicht in jedem zukünftigen Beton als Zuschlag eingesetzt werden kann. Als relativ junge Technologie liegen auch für die Hohlkörperdecken noch keine Erfahrungen im Rückbau und einer sauberen Materialtrennung vor. Es ist davon auszugehen, dass sich die Hohlkörper mit dem Beton verbinden und nicht einfach hiervon zu trennen sind. Dies kann als Nachteil für die ansonsten gute Idee begriffen werden.

### **3.2 Erdberührte Stützwand**

Für die Erdberührte Stützwand wurden verschiedene Bauteilaufbauten bei gleichem U-Wert verglichen. Neben der konventionellen Stahlbetonwand wurden ungeachtet der bauaufsichtlichen Zulassung eine Alternative aus Ökobeton und eine Stampflehmwand überprüft. Rein theoretisch wäre auch eine alternative Konstruktion mit Kalksandstein denkbar, diese läge jedoch wahrscheinlich von den ökologischen Werten her oberhalb der Stahlbetonwand, so (vergl. Kap. Holzdecken im Gebäude

Unter Berücksichtigung des ökologischen Anspruches werden im folgenden Abschnitt verschiedene Konstruktionen für Innendecken verglichen. Eine typische Konstruktion ist eine Stahlbetondecke mit einem klassisch aufgelegten, schwimmenden Zement- oder Anhydritestrich. Als moderne Holzkonstruktionen werden alternativ eine Massivholzdecke von 14cm und eine Holzbalkendecke verglichen. Zur Einhaltung der Mindest-Anforderungen des Schallschutzes (z.B.  $L'_{n,w} \leq 53$  dB) sind bei den beiden Holzbauweisen zusätzliche Beschwerungen erforderlich. Mögliche Aufbauten sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt. Hierbei wird der sonst oft übliche Zementestrich zugunsten der Rückbaubarkeit durch Lehmziegel mit einer aufgelegten doppelten Gipsfaserplatte ersetzt.

Im Ergebnis muss die Stahlbetondecken nicht weiter diskutiert werden – sie dient dem späteren Vergleich einer konventionellen Bauweise mit dem geplanten Haus (vgl. Kapitel Aktuelle Gebäudebilanz). Im Vergleich zwischen den beiden Holzbauweisen schneidet die Massivholzwand auf den ersten Blick besser ab: Sie bindet aufgrund des höheren Holzanteiles mehr Energie und hat dadurch rechnerische Vorteile, ist aber in der Praxis auch aufwändiger zu erstellen und bindet de facto mehr Material- aus dem man ggf. die nächste Decke bauen könnte. Eine überschlägige Ermittlung des Flächengewichtes führt bei der Holzbalkendecke zu ca. 180 kg/m<sup>2</sup>, bei der Massivholzdecke zu 350 kg/m<sup>2</sup> und bei der Stahlbetondecke zu über 500 kg/m<sup>2</sup>. Transporte zur Baustelle (A4) sind bisher in keine der Bilanzen eingeflossen, es zeigt sich aber hier, dass das durchaus ein bedenkenswertes Thema mit Auswirkungen auf das Ergebnis ist.

## **Rückbau**

Im Rückbau muss die Stahlbetondecke mit relativ großem Energieeinsatz abgebrochen werden. Sofern eine Abtrennung von der Bewehrung möglich ist, können der Beton und der Estrich (ohne Bewehrung als Rezyklat-Zuschlag wiederverwendet werden. Eine Nutzung auf gleichem Qualitätsniveau ohne Down-Cycling ist nicht möglich. Die Trittschalldämmung aus EPS kann in der Theorie relativ sortenrein wieder aufgenommen werden und ohne den Verschnitt einer neuen Nutzung zugeführt werden. Hierbei ist das Dilatationsverhalten, also die zeitliche Setzung zu beachten, da anfängliche dynamische Eigenschaften möglicherweise nicht mehr in gleicher Qualität vorliegen. In der

Praxis führt dies zusammen mit einem zeitintensiven Aufnahmeprozess zu einer Unwirtschaftlichkeit der Wiederverwendung, so dass bisher von einer thermischen Nachnutzung auszugehen ist.

Ähnliches gilt auch für die beiden Holzbauweisen: Grundsätzlich könnten die Gipsfaserplatten, Lehmziegel, Plattenwerkstoffe und Dämmlagen vorsichtig wieder aufgenommen und wahrscheinlich in gleicher Nutzung noch mindestens einmal verwendet werden. Schwierig wird sich auch hier die Wirtschaftlichkeit über die aufgebrauchte Arbeitszeit darstellen. Der Kies oder Splitt sollte prozessgleich zum Einbringen über entsprechenden Fördergeräte aus dem Gebäude entfernt werden können- nach einem Wasch- und Filtervorgang kann er danach auch für eine gleichwertige Nutzung in Frage kommen. Die jeweilige Primärstruktur aus Balken oder Massivholz kann aufgenommen und für Räume/ Gebäude mit kleineren Spannweiten genutzt werden. Der Weg des Down-Cyclings in Holzwerkstoffe oder eine thermische Verwertung ist natürlich ebenfalls möglich – aber nicht anzustreben. Inwieweit für die Lattung und die Federschienen in der Holzbalkendecke eine Trennung und Verwertung möglich ist, kann hier nicht gut abgeschätzt werden. Grundsätzlich könnte auch hier sorgfältig verfahren werden, praktisch dürfte es so zeitintensiv werden, dass eine Entsorgung den wirtschaftlicheren Weg darstellt. Für die Entsorgung aller Materialien sei noch einmal auf die oben aufgeführten überschlägigen Flächengewichte verwiesen- was dort an Gewicht nicht verbaut wurde, muss nun auch nicht entsorgt oder bewegt werden...

Tabelle A3.6: Ökologischer Vergleich Holzdecken

Bauteil Holzdecke																														
 <p>PE ne (MJ)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Massivholzdecke</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23mm</td> <td>Fermazell</td> <td>-265</td> </tr> <tr> <td>40mm</td> <td>Lehmziegel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>30mm</td> <td>Holzfasermatte</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>60mm</td> <td>Kiesschüttung</td> <td>1865</td> </tr> <tr> <td>0,2mm</td> <td>Faservlies</td> <td></td> </tr> <tr> <td>140mm</td> <td>Massivholzdecke</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>-124</td> </tr> </tbody> </table>		Massivholzdecke			Konstruktionsaufbau		PE ne	23mm	Fermazell	-265	40mm	Lehmziegel		30mm	Holzfasermatte	PE e	60mm	Kiesschüttung	1865	0,2mm	Faservlies		140mm	Massivholzdecke	GWP			-124
Massivholzdecke																														
Konstruktionsaufbau		PE ne																												
23mm	Fermazell	-265																												
40mm	Lehmziegel																													
30mm	Holzfasermatte	PE e																												
60mm	Kiesschüttung	1865																												
0,2mm	Faservlies																													
140mm	Massivholzdecke	GWP																												
		-124																												
 <p>PE e (MJ)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Holzbalkendecke</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23mm</td> <td>Fermazell</td> <td>-111</td> </tr> <tr> <td>20mm</td> <td>Holzfasermatte</td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>Kiesschüttung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>22mm</td> <td>OSB-Platte</td> <td>867</td> </tr> <tr> <td>200mm</td> <td>KVH mit 100 mm MiWo</td> <td></td> </tr> <tr> <td>27mm</td> <td>Lattung an Federschiene</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>18mm</td> <td>Schalung</td> <td>-55</td> </tr> </tbody> </table>		Holzbalkendecke			Konstruktionsaufbau		PE ne	23mm	Fermazell	-111	20mm	Holzfasermatte		50mm	Kiesschüttung	PE e	22mm	OSB-Platte	867	200mm	KVH mit 100 mm MiWo		27mm	Lattung an Federschiene	GWP	18mm	Schalung	-55
Holzbalkendecke																														
Konstruktionsaufbau		PE ne																												
23mm	Fermazell	-111																												
20mm	Holzfasermatte																													
50mm	Kiesschüttung	PE e																												
22mm	OSB-Platte	867																												
200mm	KVH mit 100 mm MiWo																													
27mm	Lattung an Federschiene	GWP																												
18mm	Schalung	-55																												
 <p>GWP (CO2 äqv.)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Stahlbetondecke Konventionell</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60mm</td> <td>Estrich</td> <td>1753</td> </tr> <tr> <td>40mm</td> <td>EPS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>200mm</td> <td>Stahlbeton C25/30</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>15mm</td> <td>Gipsputz</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>75</td> </tr> </tbody> </table>		Stahlbetondecke Konventionell			Konstruktionsaufbau		PE ne	60mm	Estrich	1753	40mm	EPS		200mm	Stahlbeton C25/30	PE e	15mm	Gipsputz	23			GWP			75			
Stahlbetondecke Konventionell																														
Konstruktionsaufbau		PE ne																												
60mm	Estrich	1753																												
40mm	EPS																													
200mm	Stahlbeton C25/30	PE e																												
15mm	Gipsputz	23																												
		GWP																												
		75																												

Tragende Innenwand). Auch wenn es den Vergleich etwas verwässert wurde darüber hinaus die Dämmung und das Abdichtungskonzept leicht variiert: Während die Ökobetonwand und die Stahlbetonwand konventionell mit Perimeterdämmung und einer Abdichtung gerechnet wurde, wurde für die Stampflehmwand eine mineralische Abdichtung und eine (wiederverwendbare) Schaumglasdämmung eingesetzt.

Erwartungsgemäß schneidet die konventionelle Stahlbetonwand in diesem Vergleich am schlechtesten ab. Gleichzeitig ist die Wand aus Ökobeton energetisch nur wenig besser, wobei die Datengrundlage hierzu auch noch weiter überprüft werden muss. Eine deutliche Optimierung ist aber durch den im Sinne des Klimaschutzes bei den Treibhauspotentialen zu verzeichnen: Beim GWP gelingt es mit dem Ökobeton immerhin ca. 20 Prozent der Emission einzusparen. Weitere Einsparpotentiale, z.B. durch den Einsatz von Hohlkörpern lassen sich aus statischen Gründen in diesem Bauteil nicht realisieren. Es soll aber versucht werden, im weiteren Verlauf die Rezeptur des Ökobetones noch weiter zu verbessern, um so die Nachhaltigkeit des Bauteiles zu steigern.

Unangefochten die Lösung mit der geringsten Umweltwirkung wäre eine Stampflehmwand von mind. 50 cm. Ihr Aufbau orientiert sich an bisher realisierten Aufbauten von Martin Rauch, Lehm, Ton, Erden GmbH, Vorarlberg, und hat dort bereits die Anforderungen an eine erdberührte Stützwand erfüllt. Im vorliegenden Fall kommt sie jedoch aus statischen Gründen nicht in Frage, so dass eine Betonwand, bzw. die Ökobetonwand die realisierbare Alternative darstellt – und zur Umsetzung empfohlen wird.

Tabelle A3. 2: Ökologischer Vergleich Erdberührte Stützwand

<p><b>Bauteil Erdberührte Stützwand</b></p> <p>U-Wert 0,16 W/m²K</p> <p>Wandstärken 0,4/0,5 m</p>	 <p>② Erdberührende Außenwand</p>																								
<p><b>PE ne (MJ)</b></p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Erdberührte Stahlbetonwand</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>400mm</td> <td>Stahlbeton C25/30</td> <td>1357</td> </tr> <tr> <td>1,5mm</td> <td>Abdichtung (EPDM)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>240mm</td> <td>XPS-Dämmstoff</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>1,5mm</td> <td>PE-Noppenfolie</td> <td>142</td> </tr> <tr> <td colspan="2">GWP</td> <td>110</td> </tr> </tbody> </table>	Erdberührte Stahlbetonwand		PE ne	Konstruktionsaufbau (von Innen)			400mm	Stahlbeton C25/30	1357	1,5mm	Abdichtung (EPDM)		240mm	XPS-Dämmstoff	PE e	1,5mm	PE-Noppenfolie	142	GWP		110			
Erdberührte Stahlbetonwand		PE ne																							
Konstruktionsaufbau (von Innen)																									
400mm	Stahlbeton C25/30	1357																							
1,5mm	Abdichtung (EPDM)																								
240mm	XPS-Dämmstoff	PE e																							
1,5mm	PE-Noppenfolie	142																							
GWP		110																							
<p><b>PE e (MJ)</b></p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Erdberührte Ökobetonwand</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>400mm</td> <td>Ökobeton C25/30</td> <td>1334</td> </tr> <tr> <td>1,5mm</td> <td>Abdichtung (EPDM)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>240mm</td> <td>XPS-Dämmstoff</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>1,5mm</td> <td>PE-Noppenfolie</td> <td>137</td> </tr> <tr> <td colspan="2">GWP</td> <td>85</td> </tr> </tbody> </table>	Erdberührte Ökobetonwand		PE ne	Konstruktionsaufbau (von Innen)			400mm	Ökobeton C25/30	1334	1,5mm	Abdichtung (EPDM)		240mm	XPS-Dämmstoff	PE e	1,5mm	PE-Noppenfolie	137	GWP		85			
Erdberührte Ökobetonwand		PE ne																							
Konstruktionsaufbau (von Innen)																									
400mm	Ökobeton C25/30	1334																							
1,5mm	Abdichtung (EPDM)																								
240mm	XPS-Dämmstoff	PE e																							
1,5mm	PE-Noppenfolie	137																							
GWP		85																							
<p><b>GWP (CO2 äqv.)</b></p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Erdberührte Stampflehmwand</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>20 mm</td> <td>Lehmputz</td> <td>409</td> </tr> <tr> <td>500 mm</td> <td>Stampflehm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>100 mm</td> <td>Mineralische Abdichtung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>240 mm</td> <td>Schaumglasplatten</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>600 mm</td> <td>Kiesschüttung</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">GWP</td> <td>26</td> </tr> </tbody> </table>	Erdberührte Stampflehmwand		PE ne	Konstruktionsaufbau (von Innen)			20 mm	Lehmputz	409	500 mm	Stampflehm		100 mm	Mineralische Abdichtung	PE e	240 mm	Schaumglasplatten	35	600 mm	Kiesschüttung		GWP		26
Erdberührte Stampflehmwand		PE ne																							
Konstruktionsaufbau (von Innen)																									
20 mm	Lehmputz	409																							
500 mm	Stampflehm																								
100 mm	Mineralische Abdichtung	PE e																							
240 mm	Schaumglasplatten	35																							
600 mm	Kiesschüttung																								
GWP		26																							



### 3.3 Repräsentative Fassade / Außenwand

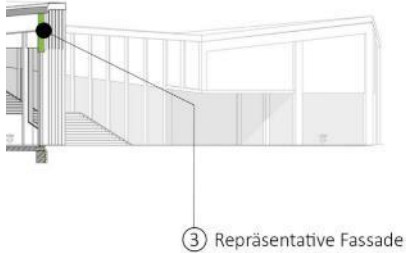
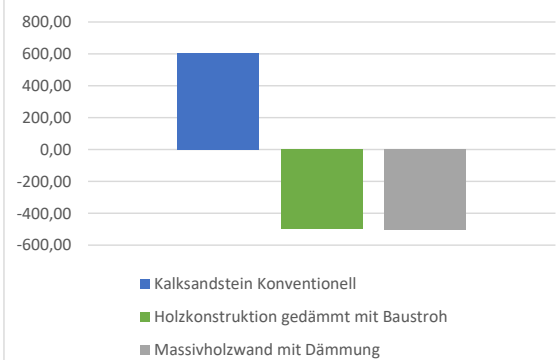
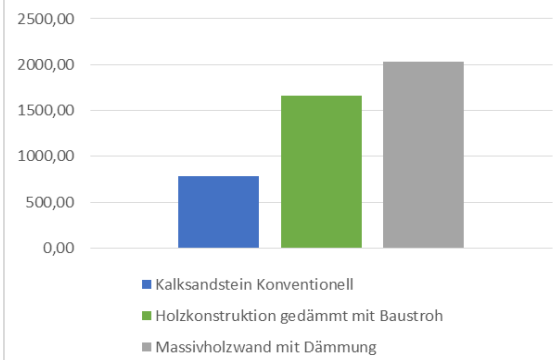
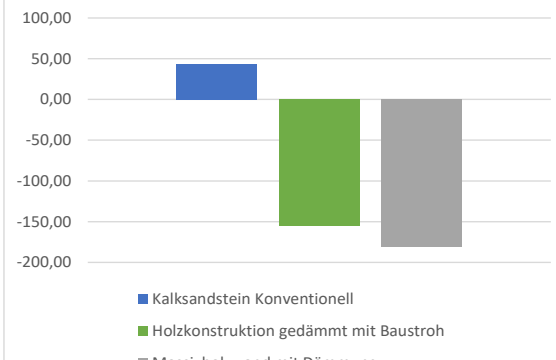
Die opake Außenwand des Gebäudes soll nach Außen in jedem Fall mit einer Holzschalung in Erscheinung treten. Die Konstruktion dahinter steht jedoch weniger fest und wurde im Folgenden in drei Varianten untersucht. Zunächst lässt sich die Fassade sehr kostengünstig als Kalksandsteinwand aufmauern. Mit Innenputz und einer Außendämmung würde diese mit einer vorgehängten Holzkonstruktion so bekleidet, dass die gewünschte Optik erreicht wird. In der zweiten Variante wird eine Massivholzwand betrachtet, die auf der Innenseite so mit einer Lehmbauplatte bekleidet wird, dass eine Installationsschicht entsteht, auf der Außenseite erfolgt die gleiche Bekleidung wie in Variante 1. In der dritten Variante bilden Holzständer/-leitern die tragende Konstruktion aus, die Hauptdämmung wird mit Stroh eingebracht, welches theoretisch sogar auf dem Museumsgelände erzeugt werden könnte. Auch hier gibt es die gleiche Holzschalung auf der äußeren Sichtseite. Als U-Wert wurde für alle drei Konstruktionen  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  festgelegt.

Im Ergebnis schneidet die Kalksandsteinwand in allen Kategorien nicht gut ab, obwohl sie normalen Baugeschehen natürlich weit verbreitet ist (vgl. Tabelle A3.3). Im Hinblick auf die angestrebte  $\text{CO}_2$ -Optimierung sind entsprechend die Massivholzwand und die Strohbauwand vorzuziehen und hier näher zu betrachten. Aufgrund der hohen  $\text{CO}_2$ -Bindung und der möglichen energetischen Nutzung fällt die Wirkungsbilanz für die Wände aus nachwachsenden Rohstoffen günstiger aus. Beide bieten das Potential einer späteren energetischen Nutzung, so dass auch ein hoher Anteil an erneuerbarer Energie eingelagert ist. Dieser ist bei der Massivholzwand noch etwas höher, weswegen diese zunächst vorzuziehen ist und so oder so ähnlich umgesetzt werden kann.

#### **Rückbau:**

Wie bereits an anderer Stelle erläutert ist eine Kalksandsteinwand nur mit erhöhtem Aufwand zurückzubauen. Für die vorgesezte Fassade und die beiden biogenen Außenwandaufbauten gilt dagegen, dass sie leicht und im Wesentlichen sortenrein wieder zurückzubauen sind. Abhängig von Flammhemmern, Pestiziden und Hydrophobierungen, die es bei der Materialauswahl natürlich zu vermeiden gilt, können die Materialien anschließend einer neuen Nutzung zugeführt werden. Selbst das EoL- Szenario bereitet hier keine Probleme: Alle enthaltenen Stoffe können einer thermischen Verwertung zugeführt werden oder auch einfach durch Verrottung wieder in einen natürlichen Kreislauf eingespeist werden.

Tabelle A3.3: Ökologischer Vergleich Hauptfassade

<p>Fassade</p> <p>U-Wert 0,15 W/m²K</p>																					
<p>PE ne (MJ)</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Kalksandstein Konventionell</th> </tr> <tr> <th>Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15mm Gipsputz</td> <td>605</td> </tr> <tr> <td>240mm Kalksandstein</td> <td></td> </tr> <tr> <td>200mm Steinwolle</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>200mm Holz Unterkonstruktion</td> <td>785</td> </tr> <tr> <td>Unterspannbahn PP</td> <td></td> </tr> <tr> <td>60mm Lattung/-Konterlattung</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>KVH Holzlamellen</td> <td>43</td> </tr> </tbody> </table>	Kalksandstein Konventionell		Konstruktionsaufbau	PE ne	15mm Gipsputz	605	240mm Kalksandstein		200mm Steinwolle	PE e	200mm Holz Unterkonstruktion	785	Unterspannbahn PP		60mm Lattung/-Konterlattung	GWP	KVH Holzlamellen	43		
Kalksandstein Konventionell																					
Konstruktionsaufbau	PE ne																				
15mm Gipsputz	605																				
240mm Kalksandstein																					
200mm Steinwolle	PE e																				
200mm Holz Unterkonstruktion	785																				
Unterspannbahn PP																					
60mm Lattung/-Konterlattung	GWP																				
KVH Holzlamellen	43																				
<p>PE e (MJ)</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Holzkonstruktion gedämmt mit Baustroh</th> </tr> <tr> <th>Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 mm Lehmputz</td> <td>-499</td> </tr> <tr> <td>20mm Lehmbohle</td> <td></td> </tr> <tr> <td>30 mm Lattung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>20mm Massivholzplatte</td> <td>1658</td> </tr> <tr> <td>300mm KVH/ Strohdämmung</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,5mm Winddichtung</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>60mm Lattung-/Konterlattung Lärche</td> <td>-155</td> </tr> <tr> <td>KVH -Holzlamellen</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Holzkonstruktion gedämmt mit Baustroh		Konstruktionsaufbau	PE ne	2 mm Lehmputz	-499	20mm Lehmbohle		30 mm Lattung	PE e	20mm Massivholzplatte	1658	300mm KVH/ Strohdämmung		0,5mm Winddichtung	GWP	60mm Lattung-/Konterlattung Lärche	-155	KVH -Holzlamellen	
Holzkonstruktion gedämmt mit Baustroh																					
Konstruktionsaufbau	PE ne																				
2 mm Lehmputz	-499																				
20mm Lehmbohle																					
30 mm Lattung	PE e																				
20mm Massivholzplatte	1658																				
300mm KVH/ Strohdämmung																					
0,5mm Winddichtung	GWP																				
60mm Lattung-/Konterlattung Lärche	-155																				
KVH -Holzlamellen																					
<p>GWP (CO2 äqv.)</p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Massivholzwand mit Holzfaserdämmung</th> </tr> <tr> <th>Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 mm Lehmputz</td> <td>-505</td> </tr> <tr> <td>20mm Lehmbohle</td> <td></td> </tr> <tr> <td>30 mm Lattung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>250mm Massivholzwand</td> <td>2035</td> </tr> <tr> <td>250mm Dämmung (Holzfaserplatte)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>60mm Lattung-/Konterlattung</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>20mm Schnittholz Buche</td> <td>-181</td> </tr> </tbody> </table>	Massivholzwand mit Holzfaserdämmung		Konstruktionsaufbau	PE ne	2 mm Lehmputz	-505	20mm Lehmbohle		30 mm Lattung	PE e	250mm Massivholzwand	2035	250mm Dämmung (Holzfaserplatte)		60mm Lattung-/Konterlattung	GWP	20mm Schnittholz Buche	-181		
Massivholzwand mit Holzfaserdämmung																					
Konstruktionsaufbau	PE ne																				
2 mm Lehmputz	-505																				
20mm Lehmbohle																					
30 mm Lattung	PE e																				
250mm Massivholzwand	2035																				
250mm Dämmung (Holzfaserplatte)																					
60mm Lattung-/Konterlattung	GWP																				
20mm Schnittholz Buche	-181																				

### 3.4 Dachkonstruktion Holz

Für den großen Ausstellungsbereich war bereits im Wettbewerbsentwurf ein Holzdach mit entsprechend inszeniertem Holztragewerk vorgesehen. In der Weiterentwicklung des Entwurfes kam die Idee auf, Altholz für dieses Bauteil zu verwenden. Für die nachfolgende Betrachtung wurden dennoch die normalen Umweltproduktdata für Bauholz angesetzt, da zum Zeitpunkt der Berichtlegung noch nicht feststand, in welchem Umfang Alt –und Resthölzer zur Verfügung stehen und genutzt werden können.

Auch für die Deckenkonstruktion werden drei Grundvarianten gebildet: eine („konventionelle“) Stahlbetondecke mit Spannbetonhohldielen sowie zwei unterschiedliche Holzkonstruktionen: Das erste ist ein System mit etwa 2 m hohen, parallelen Fachwerkträgern, das zweite ein System mit einem Trägerrost von 1,60 m Höhe auf einem Grundraster von 2.00 m x 2.00 m. Als Deckenfläche kommt jeweils eine 8 cm bzw. 4 cm starke Massivholzplatte (Fachwerkträger bzw. Trägerrost) zum Einsatz. Als Dämmung werden eine Holzwolledämmung und eine Steinwolle betrachtet.

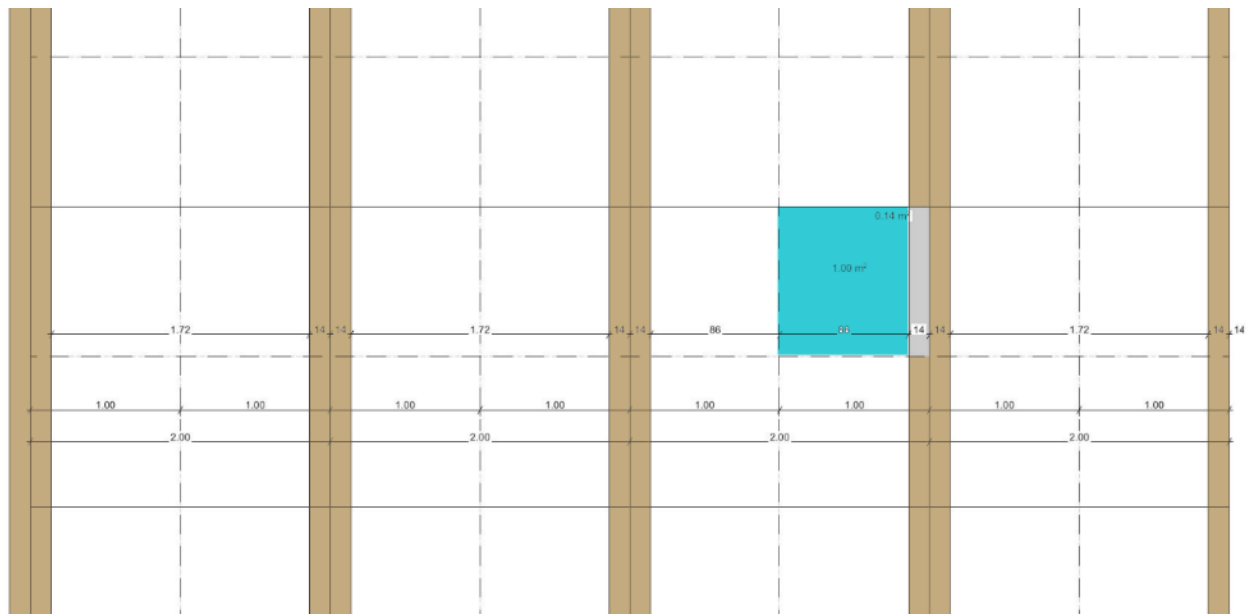


Abbildung A3.31: Systemskizze einfacher Fachwerkträger

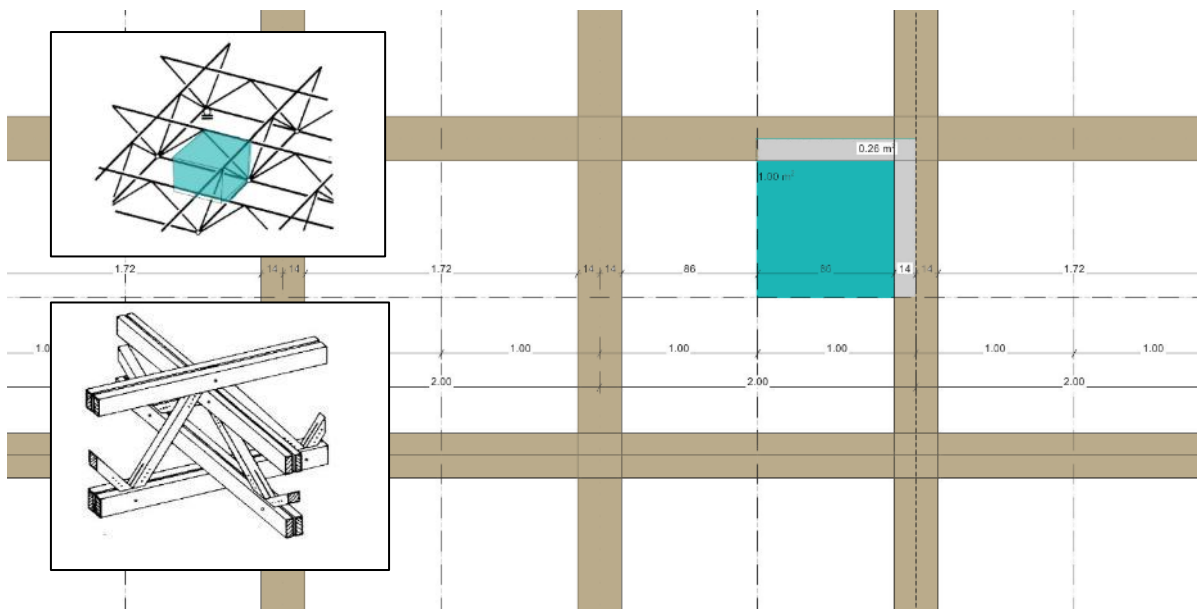


Abbildung A3.32: Systemskizzen Trägerrost

Die grob vordimensionierten Tragwerke wurden für die Ökobilanz in eine flächenspezifische Holzdicke umgerechnet (12 cm/m<sup>2</sup> für den Fachwerkträger; 23 cm/m<sup>2</sup> für den Trägerrost). Die Variante mit der Spannbetonhohldiele dient in erster Linie dem Gebäudevergleich mit der konventionellen Bauweise. Hierfür wurde bei einer Spannweite von ca. 22,5 m eine 40cm hohe Hohldiele ausgewählt. Die Betrachtung endet jeweils an der Dachabdichtung, Aufbauten, die darüber stattfinden hätten die gleiche Ausprägung, so dass sie im Variantenvergleich keine Rolle spielen.


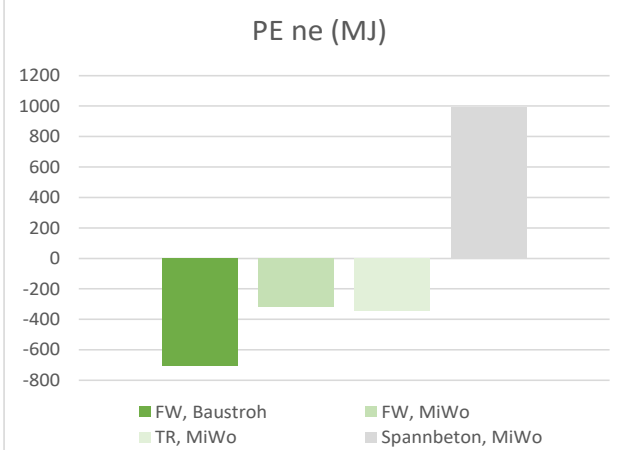
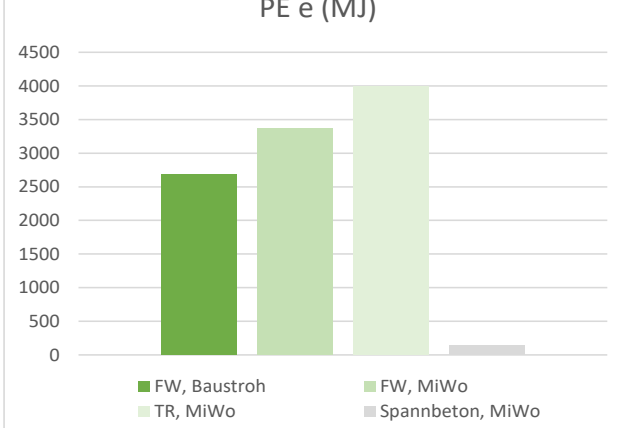
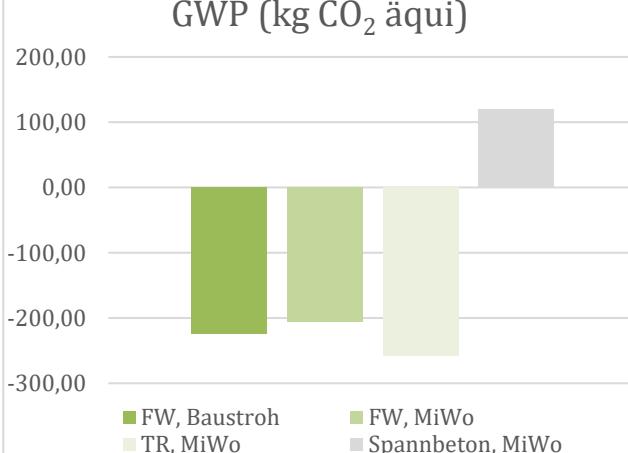
Die drei Systeme werden gemeinsam mit der Dachkonstruktion in den Punkten PE<sub>ne</sub>, PE<sub>e</sub> und GWP verglichen. Der U-Wert wurde einheitlich auf 0,12 W/m<sup>2</sup>K festgeschrieben.

Eine Unterscheidung in Norm-Beton/ Ökobeton wurde nicht vorgenommen, es wurde davon ausgegangen, dass die Vergussmasse für die Auflager (pauschal 4cm Ortbeton) der Hohldielen im Verhältnis zur Gesamtfläche zu vernachlässigen ist.

Im Ergebnis benötigt die Variante Fachwerkträger mit Strohdämmung am wenigsten nicht-erneuerbare Energie, verliert aber etwas bei der erneuerbaren Energie und dem Global-Warming-Potential.

Hier liegt der Trägerrost aufgrund des etwas höheren Holzanteiles in der Konstruktion leicht vorne. Der Wechsel auf eine Steinwoll-Dämmung verbraucht einen großen Anteil an nicht erneuerbarer Primärenergie, so dass unabhängig vom Tragwerk eine Strohdämmung zu empfehlen ist. Der Unterschied zwischen Trägerrost und Fachwerkträger beträgt dagegen pro Quadratmeter gerade mal 25 MJ an nicht erneuerbarer Energie (7 kWh), bzw. etwa 50 kg mehr gebundenes CO<sub>2</sub>. Dieser Unterschied ist so gering, dass er ohne eine genaue Dimensionierung beider Tragwerke hier keine Bedeutung hat. Die Umsetzungsempfehlung geht in jedem Fall klar in Richtung eines Holztragwerkes mit biotischen/ biogenen Dämmstoffen und unterstreicht die klare Haltung im Wettbewerbsentwurf. Im Vergleich zu einer konventionellen Betondecke, hier repräsentiert durch die Spannbetonhohldielen, können nach der Berechnung bis zu 350 kg CO<sub>2</sub> Äquivalent pro m<sup>2</sup> eingespart werden.

Tabelle A3.4: Ökologischer Vergleich Dachkonstruktion

<p>Bauteil: Holzdach-Konstruktion</p> <p>U-Wert: 0,12 W/m²K</p>																												
<p>PE ne (MJ)</p> 	<p>Fachwerkträger, gedämmt mit Baustroh</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>120 mm</td> <td>Fachwerkträger</td> <td>-704</td> </tr> <tr> <td>80mm</td> <td>Dübelholzplatte</td> <td></td> </tr> <tr> <td>440mm</td> <td>Baustroh als Zwischendämmung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>440mm</td> <td>Konstruktionsvollholz</td> <td>2679</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Unterspannbahn PP</td> <td></td> </tr> <tr> <td>80mm</td> <td>Lattung/-Konterlattung</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>20mm</td> <td>Holzwerkstoffplatte OSB</td> <td>-225</td> </tr> <tr> <td>1,5mm</td> <td>EPDM Abdichtungsbahn</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne	120 mm	Fachwerkträger	-704	80mm	Dübelholzplatte		440mm	Baustroh als Zwischendämmung	PE e	440mm	Konstruktionsvollholz	2679		Unterspannbahn PP		80mm	Lattung/-Konterlattung	GWP	20mm	Holzwerkstoffplatte OSB	-225	1,5mm	EPDM Abdichtungsbahn	
Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne																										
120 mm	Fachwerkträger	-704																										
80mm	Dübelholzplatte																											
440mm	Baustroh als Zwischendämmung	PE e																										
440mm	Konstruktionsvollholz	2679																										
	Unterspannbahn PP																											
80mm	Lattung/-Konterlattung	GWP																										
20mm	Holzwerkstoffplatte OSB	-225																										
1,5mm	EPDM Abdichtungsbahn																											
<p>PE e (MJ)</p> 	<p>Fachwerkträger, gedämmt mit Mineralwolle</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>120 mm</td> <td>Fachwerkträger</td> <td>-99</td> </tr> <tr> <td>80mm</td> <td>Dübelholzplatte</td> <td></td> </tr> <tr> <td>240 mm</td> <td>Baustroh als Zwischendämmung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>240 mm</td> <td>Konstruktionsvollholz</td> <td>2170</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Unterspannbahn PP</td> <td></td> </tr> <tr> <td>80mm</td> <td>Lattung/-Konterlattung</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>20mm</td> <td>Holzwerkstoffplatte OSB</td> <td>-114</td> </tr> <tr> <td>1,5mm</td> <td>EPDM Abdichtungsbahn</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne	120 mm	Fachwerkträger	-99	80mm	Dübelholzplatte		240 mm	Baustroh als Zwischendämmung	PE e	240 mm	Konstruktionsvollholz	2170		Unterspannbahn PP		80mm	Lattung/-Konterlattung	GWP	20mm	Holzwerkstoffplatte OSB	-114	1,5mm	EPDM Abdichtungsbahn	
Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne																										
120 mm	Fachwerkträger	-99																										
80mm	Dübelholzplatte																											
240 mm	Baustroh als Zwischendämmung	PE e																										
240 mm	Konstruktionsvollholz	2170																										
	Unterspannbahn PP																											
80mm	Lattung/-Konterlattung	GWP																										
20mm	Holzwerkstoffplatte OSB	-114																										
1,5mm	EPDM Abdichtungsbahn																											
<p>GWP (kg CO<sub>2</sub> äqui)</p> 	<p>Trägerrost, gedämmt mit Mineralwolle</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>230mm</td> <td>Trägerrost KVH</td> <td>79</td> </tr> <tr> <td>40 mm</td> <td>Dübelholzplatte</td> <td></td> </tr> <tr> <td>240x120mm</td> <td>Konstruktionsvollholz</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>240mm</td> <td>Steinwolle</td> <td>1706</td> </tr> <tr> <td>30mm</td> <td>Holzfaserdämmung</td> <td></td> </tr> <tr> <td>80mm</td> <td>Lattung</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>20mm</td> <td>Holzwerkstoffplatte OSB</td> <td>-82</td> </tr> <tr> <td>1.5mm</td> <td>EPDM Abdichtungsbahn</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne	230mm	Trägerrost KVH	79	40 mm	Dübelholzplatte		240x120mm	Konstruktionsvollholz	PE e	240mm	Steinwolle	1706	30mm	Holzfaserdämmung		80mm	Lattung	GWP	20mm	Holzwerkstoffplatte OSB	-82	1.5mm	EPDM Abdichtungsbahn	
Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne																										
230mm	Trägerrost KVH	79																										
40 mm	Dübelholzplatte																											
240x120mm	Konstruktionsvollholz	PE e																										
240mm	Steinwolle	1706																										
30mm	Holzfaserdämmung																											
80mm	Lattung	GWP																										
20mm	Holzwerkstoffplatte OSB	-82																										
1.5mm	EPDM Abdichtungsbahn																											
	<p>Spannbetonhohldielen, gedämmt mit Mineralwolle</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau (von Innen)</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10mm</td> <td>Gipsputz</td> <td>996</td> </tr> <tr> <td>400 mm</td> <td>Spannbetonhohldiele</td> <td></td> </tr> <tr> <td>40 mm</td> <td>Ortbeton</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>240mm</td> <td>EPS / XPS</td> <td>131</td> </tr> <tr> <td>10mm</td> <td>bituminöse Abdichtung</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>120</td> </tr> </tbody> </table>	Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne	10mm	Gipsputz	996	400 mm	Spannbetonhohldiele		40 mm	Ortbeton	PE e	240mm	EPS / XPS	131	10mm	bituminöse Abdichtung				GWP			120			
Konstruktionsaufbau (von Innen)		PE ne																										
10mm	Gipsputz	996																										
400 mm	Spannbetonhohldiele																											
40 mm	Ortbeton	PE e																										
240mm	EPS / XPS	131																										
10mm	bituminöse Abdichtung																											
		GWP																										
		120																										

## Rückbau:

Die geplante Holzkonstruktion soll zugunsten eines sortenreinen Rückbaus ohne schädliche Leim- oder Metallverbindungen gefertigt werden. Entsprechend sollten sich im End-of-Life- Szenario alle Bauteilschichten des Holzdaches sauber wieder trennen lassen und einer individuellen Recycling oder Entsorgungsstrategie zugeführt werden können. Auch die Spannbetonhohldielen-Decke lässt sich zunächst schichtenweise auseinander nehmen. Die Spannbetonhohldielen können wieder als Elemente aufgenommen werden und im besten Fall erneut verwendet werden. Realistischer ist aber wohl ein Recycling im gebrochenen Zustand, entweder als bereits mehrfach erwähntes Recyclat oder als Substitution von Schotter etc.

### 3.5 Dach, begehbar

Ebenfalls von Beginn an stand fest, dass bestimmte Teile des Daches aufgrund der Verkehrslasten und Nutzungsanforderungen nur in Beton ausgeführt werden können. Hierzu gehört vor allem das Dach zwischen den Gebäuden, über dem Foyer und unter der großen Freitreppe. Für diese Bauteile wurde eine Ausführung mit Ökobeton und Hohlkörpern empfohlen.

Im ökologischen Vergleich verschiedener Bauweisen wird eine konventionelle Stahlbetondecke mit einer Lösung aus Ökobeton und eingesetzten Hohlkörpern verglichen. Speziell im Atrium ist aus der ökologischen Sicht der Verfasser auch eine Kassettendecke möglich – diese hat den Vorteil, dass keine verbleibenden Einsatzkörper notwendig sind, um den Beton zu verdrängen. Auch didaktisch ließe sich diese Fläche gut in das Thema der Betonsubstitution einbinden, da die Kassetten von unten sichtbar wären und man dem Museumsbesucher die Konstruktion (und ihre Aufgabe) gut erklären könnte. Dagegen spricht jedoch ein stark erhöhter Schalungsaufwand, da die einzelnen Kassetten angefertigt und lagestabil in/an der Deckenschalung befestigt werden müssen.

In der Ökobilanz wurde dieser Ansatz erneut mit einer groben Vordimensionierung der Konstruktionen gerechnet. Dies erscheint vor allem im Hinblick auf die Bewehrung kritisch, da rechnerisch wahrscheinlich unterschiedliche Ansätze für die Stahlbetondecke, die Flachdecke mit den Hohlkörpern und die Kassettendecke erforderlich wären. Aktuell ist jede Variante mit einem Bewehrungsanteil von 1% gerechnet, was z.B. für die Kassettendecke wenig ist. Als statische Höhe stammen die 50cm aus der Vorbemessung durch den Statiker, die 80 cm hohe Kassettendecke wurde überschlägig selbst dimensioniert. Der Mehraufwand für Schalung wurde nicht berücksichtigt, könnte aber über eine pauschale Erhöhung der Primärenergiewerte eingerechnet werden.

Als druckfeste Dämmung wurde in allen Varianten einheitlich eine Schaumglasplatte berücksichtigt. Diese lässt sich im Rückbau aufnehmen und ggf. durch Einschmelzen wiederverwerten.

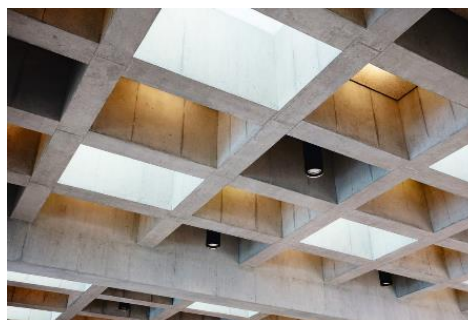

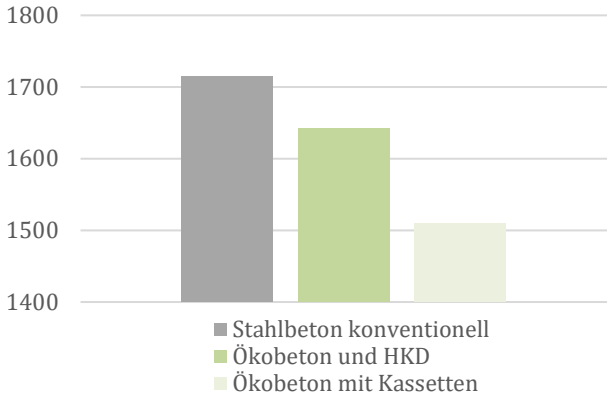
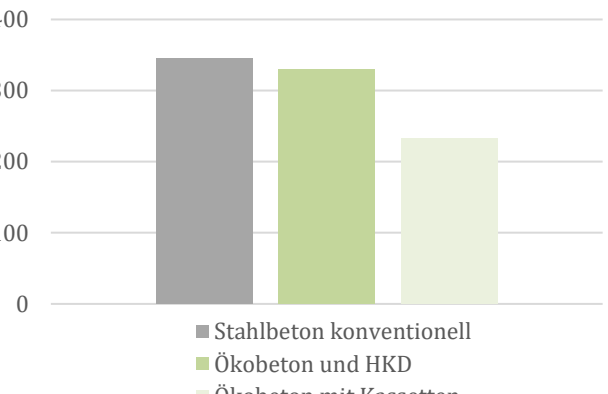
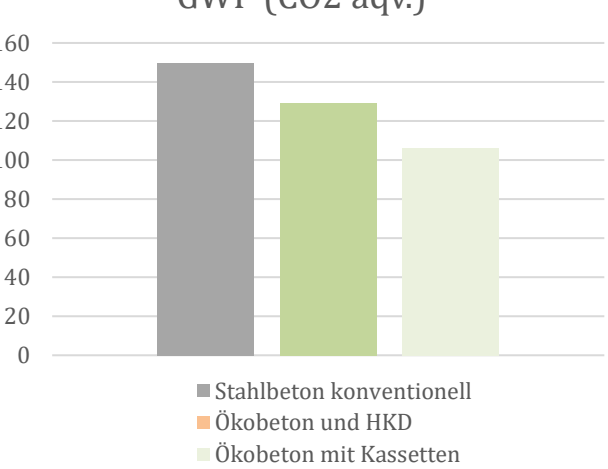


Abbildung A3.33: Kassettendecke aus Beton als vorgefertigte Schalung (links) und fertiges Bauteil (rechts) in einem Altenheim in Arbon, Singer Baenzinger Architekten, 2019 (Morris Breunig, 2020)

Tabelle A3.5: Ökologischer Vergleich begehbare Decke

<p>Begehbare Dach U-Wert 0,12 W/m²K</p>																						
<p><b>PE ne (MJ)</b></p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Ökobeton mit Kassetten</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>238mm</td> <td>Ökobeton Kasette</td> <td>1509</td> </tr> <tr> <td>140 mm</td> <td>Ökobeton</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>8mm</td> <td>Bitumenbahn</td> <td>233</td> </tr> <tr> <td>360mm</td> <td>Schaumglasplatte</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>20mm</td> <td>Schichtholzplatte</td> <td>106</td> </tr> </tbody> </table>	Ökobeton mit Kassetten			Konstruktionsaufbau		PE ne	238mm	Ökobeton Kasette	1509	140 mm	Ökobeton	PE e	8mm	Bitumenbahn	233	360mm	Schaumglasplatte	GWP	20mm	Schichtholzplatte	106
Ökobeton mit Kassetten																						
Konstruktionsaufbau		PE ne																				
238mm	Ökobeton Kasette	1509																				
140 mm	Ökobeton	PE e																				
8mm	Bitumenbahn	233																				
360mm	Schaumglasplatte	GWP																				
20mm	Schichtholzplatte	106																				
<p><b>PE e (MJ)</b></p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Ökobeton und HKD</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500mm</td> <td>Ökobeton-HKD mit Hohlkörpern</td> <td>1642</td> </tr> <tr> <td>8mm</td> <td>Bitumenbahn</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>360mm</td> <td>Schaumglasplatte</td> <td>330</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>129</td> </tr> </tbody> </table>	Ökobeton und HKD			Konstruktionsaufbau		PE ne	500mm	Ökobeton-HKD mit Hohlkörpern	1642	8mm	Bitumenbahn	PE e	360mm	Schaumglasplatte	330			GWP			129
Ökobeton und HKD																						
Konstruktionsaufbau		PE ne																				
500mm	Ökobeton-HKD mit Hohlkörpern	1642																				
8mm	Bitumenbahn	PE e																				
360mm	Schaumglasplatte	330																				
		GWP																				
		129																				
<p><b>GWP (CO2 äqv.)</b></p> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Stahlbeton konventionell</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>500mm</td> <td>Stahlbeton C25/30</td> <td>1714</td> </tr> <tr> <td>8mm</td> <td>Bitumenbahn</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>360mm</td> <td>Schaumglasplatte</td> <td>345</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>150</td> </tr> </tbody> </table>	Stahlbeton konventionell			Konstruktionsaufbau		PE ne	500mm	Stahlbeton C25/30	1714	8mm	Bitumenbahn	PE e	360mm	Schaumglasplatte	345			GWP			150
Stahlbeton konventionell																						
Konstruktionsaufbau		PE ne																				
500mm	Stahlbeton C25/30	1714																				
8mm	Bitumenbahn	PE e																				
360mm	Schaumglasplatte	345																				
		GWP																				
		150																				



### 3.6 Holzdecken im Gebäude

Unter Berücksichtigung des ökologischen Anspruches werden im folgenden Abschnitt verschiedene Konstruktionen für Innendecken verglichen. Eine typische Konstruktion ist eine Stahlbetondecke mit einem klassisch aufgelegten, schwimmenden Zement- oder Anhydritestrich. Als moderne Holzkonstruktionen werden alternativ eine Massivholzdecke von 14cm und eine Holzbalkendecke verglichen. Zur Einhaltung der Mindest-Anforderungen des Schallschutzes (z.B.  $L'_{n,w} \leq 53$  dB) sind bei den beiden Holzbauweisen zusätzliche Beschwerungen erforderlich. Mögliche Aufbauten sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Hierbei wird der sonst oft übliche Zementestrich zugunsten der Rückbaubarkeit durch Lehmziegel mit einer aufgelegten doppelten Gipsfaserplatte ersetzt.

Im Ergebnis muss die Stahlbetondecken nicht weiter diskutiert werden – sie dient dem späteren Vergleich einer konventionellen Bauweise mit dem geplanten Haus (vgl. Kapitel Aktuelle Gebäudebilanz). Im Vergleich zwischen den beiden Holzbauweisen schneidet die Massivholzwand auf den ersten Blick besser ab: Sie bindet aufgrund des höheren Holzanteiles mehr Energie und hat dadurch rechnerische Vorteile, ist aber in der Praxis auch aufwändiger zu erstellen und bindet de facto mehr Material- aus dem man ggf. die nächste Decke bauen könnte. Eine überschlägige Ermittlung des Flächengewichtes führt bei der Holzbalkendecke zu ca. 180 kg/m<sup>2</sup>, bei der Massivholzdecke zu 350 kg/m<sup>2</sup> und bei der Stahlbetondecke zu über 500 kg/m<sup>2</sup>. Transporte zur Baustelle (A4) sind bisher in keine der Bilanzen eingeflossen, es zeigt sich aber hier, dass das durchaus ein bedenkenswertes Thema mit Auswirkungen auf das Ergebnis ist.

#### Rückbau

Im Rückbau muss die Stahlbetondecke mit relativ großem Energieeinsatz abgebrochen werden. Sofern eine Abtrennung von der Bewehrung möglich ist, können der Beton und der Estrich (ohne Bewehrung als Rezyklat-Zuschlag wiederverwendet werden. Eine Nutzung auf gleichem Qualitätsniveau ohne Down-Cycling ist nicht möglich. Die Trittschalldämmung aus EPS kann in der Theorie relativ sortenrein wieder aufgenommen werden und ohne den Verschnitt einer neuen Nutzung zugeführt werden. Hierbei ist das Dilatationsverhalten, also die zeitliche Setzung zu beachten, da anfängliche dynamische Eigenschaften möglicherweise nicht mehr in gleicher Qualität vorliegen. In der Praxis führt dies zusammen mit einem zeitintensiven Aufnahmeprozess zu einer Unwirtschaftlichkeit der Wiederverwendung, so dass bisher von eine thermischen Nachnutzung auszugehen ist.

Ähnliches gilt auch für die beiden Holzbauweisen: Grundsätzlich könnten die Gipsfaserplatten, Lehmziegel, Plattenwerkstoffe und Dämmlagen vorsichtig wieder aufgenommen und wahrscheinlich in gleicher Nutzung noch mindestens einmal verwendet werden. Schwierig wird sich auch hier die Wirtschaftlichkeit über die aufgebrauchte Arbeitszeit darstellen. Der Kies oder Splitt sollte prozessgleich zum Einbringen über entsprechenden Fördergeräte aus dem Gebäude entfernt werden können- nach einem Wasch- und Filtervorgang kann er danach auch für eine gleichwertige Nutzung in Frage kommen. Die jeweilige Primärstruktur aus Balken oder Massivholz kann aufgenommen und für Räume/ Gebäude mit kleineren Spannweiten genutzt werden. Der Weg des Down-Cyclings in Holzwerkstoffe oder eine thermische Verwertung ist natürlich ebenfalls möglich – aber nicht anzustreben. Inwieweit für die Lattung und die Federschiene in der Holzbalkendecke eine Trennung und Verwertung möglich ist, kann hier nicht gut abgeschätzt werden. Grundsätzlich könnte auch hier sorgfältig verfahren werden, praktisch dürfte es so zeitintensiv werden, dass eine Entsorgung den wirtschaftlicheren Weg darstellt. Für die Entsorgung aller Materialien sei noch einmal auf die oben aufgeführten überschlägigen Flächengewichte verwiesen- was dort an Gewicht nicht verbaut wurde, muss nun auch nicht entsorgt oder bewegt werden...

Tabelle A3.6: Ökologischer Vergleich Holzdecken

Bauteil Holzdecke																													
 <p>PE ne (MJ)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Massivholzdecke</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23mm</td> <td>Fermazell</td> <td>-265</td> </tr> <tr> <td>40mm</td> <td>Lehmziegel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>30mm</td> <td>Holzfasermatte</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>60mm</td> <td>Kiesschüttung</td> <td>1865</td> </tr> <tr> <td>0,2mm</td> <td>Faservlies</td> <td></td> </tr> <tr> <td>140mm</td> <td>Massivholzdecke</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>-124</td> </tr> </tbody> </table>	Massivholzdecke			Konstruktionsaufbau		PE ne	23mm	Fermazell	-265	40mm	Lehmziegel		30mm	Holzfasermatte	PE e	60mm	Kiesschüttung	1865	0,2mm	Faservlies		140mm	Massivholzdecke	GWP			-124
Massivholzdecke																													
Konstruktionsaufbau		PE ne																											
23mm	Fermazell	-265																											
40mm	Lehmziegel																												
30mm	Holzfasermatte	PE e																											
60mm	Kiesschüttung	1865																											
0,2mm	Faservlies																												
140mm	Massivholzdecke	GWP																											
		-124																											
 <p>PE e (MJ)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Holzbalkendecke</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>23mm</td> <td>Fermazell</td> <td>-111</td> </tr> <tr> <td>20mm</td> <td>Holzfasermatte</td> <td></td> </tr> <tr> <td>50mm</td> <td>Kiesschüttung</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>22mm</td> <td>OSB-Platte</td> <td>867</td> </tr> <tr> <td>200mm</td> <td>KVH mit 100 mm MiWo</td> <td></td> </tr> <tr> <td>27mm</td> <td>Lattung an Federschiene</td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td>18mm</td> <td>Schalung</td> <td>-55</td> </tr> </tbody> </table>	Holzbalkendecke			Konstruktionsaufbau		PE ne	23mm	Fermazell	-111	20mm	Holzfasermatte		50mm	Kiesschüttung	PE e	22mm	OSB-Platte	867	200mm	KVH mit 100 mm MiWo		27mm	Lattung an Federschiene	GWP	18mm	Schalung	-55
Holzbalkendecke																													
Konstruktionsaufbau		PE ne																											
23mm	Fermazell	-111																											
20mm	Holzfasermatte																												
50mm	Kiesschüttung	PE e																											
22mm	OSB-Platte	867																											
200mm	KVH mit 100 mm MiWo																												
27mm	Lattung an Federschiene	GWP																											
18mm	Schalung	-55																											
 <p>GWP (CO2 äqv.)</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Stahlbetondecke Konventionell</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>60mm</td> <td>Estrich</td> <td>1753</td> </tr> <tr> <td>40mm</td> <td>EPS</td> <td></td> </tr> <tr> <td>200mm</td> <td>Stahlbeton C25/30</td> <td>PE e</td> </tr> <tr> <td>15mm</td> <td>Gipsputz</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>GWP</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>75</td> </tr> </tbody> </table>	Stahlbetondecke Konventionell			Konstruktionsaufbau		PE ne	60mm	Estrich	1753	40mm	EPS		200mm	Stahlbeton C25/30	PE e	15mm	Gipsputz	23			GWP			75			
Stahlbetondecke Konventionell																													
Konstruktionsaufbau		PE ne																											
60mm	Estrich	1753																											
40mm	EPS																												
200mm	Stahlbeton C25/30	PE e																											
15mm	Gipsputz	23																											
		GWP																											
		75																											

### 3.7 Tragende Innenwand

Tragende Innenwände sind im Massivbau üblicherweise aus Mauerwerk (Kalksandstein/ Ziegel) oder aus Beton. Im Leichtbau existieren mehr Möglichkeiten angefangen von leichten, tragenden Porenbetonwänden bis hin zu Holzständer- oder Holzfachwerkwänden. Für das vorliegende Projekt wurde von uns aus verschiedenen Gründen (u.a. der Raumklimatik) eine tragende Stampflehmwand empfohlen. Neben den herstellungstechnischen Vorteilen hat Lehm eine nachgewiesene positive raumklimatische Wirkung, ist regional verfügbar und lässt sich vollständig wieder verwerten. Als Alternativen sollen in der hier durchgeführten ökologischen Betrachtung eine Mauerwerkswand aus Kalksandstein und eine Betonwand berechnet werden.

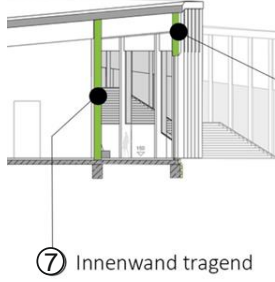
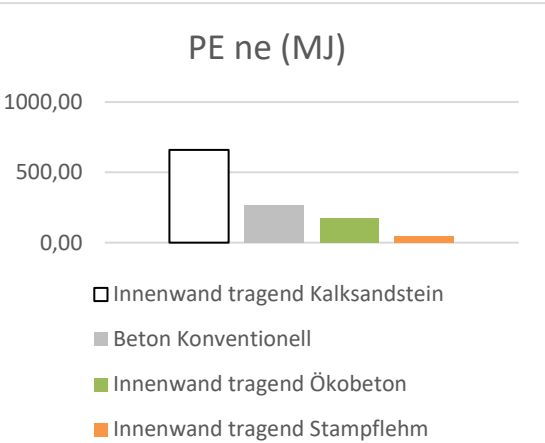
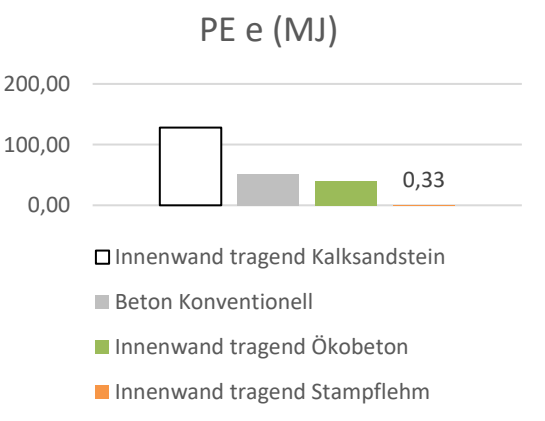
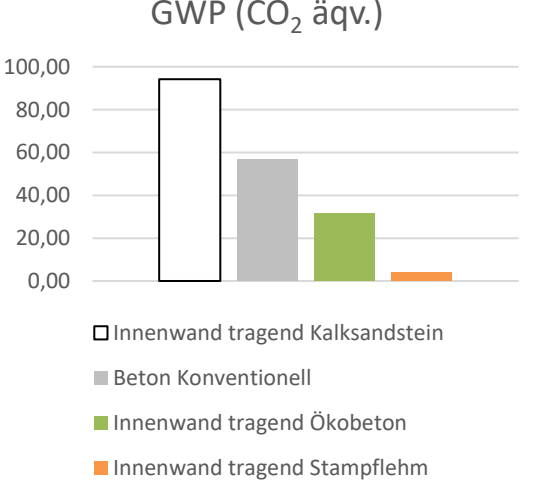
Im ökologischen Vergleich zeigt sich, dass die Lehmwand trotz ihrer Materialstärke in allen drei Wirkkategorien (PE<sub>ne</sub>, PE<sub>e</sub>, und GWP) den geringsten ökologischen Fußabdruck hinterlässt. Im Bereich der nicht erneuerbaren Primärenergie benötigt sie zehnmal weniger Energie als die betrachtete Kalksandsteinwand und nur etwa ein Fünftel der Energie einer konventionellen Stahlbetonwand.

Wichtigstes Kriterium für dieses Forschungsprojekt sollte jedoch das GWP, bzw. die Klimawirkung der hier betrachteten Konstruktionen. Hier verursacht die Herstellung der Lehmwand nur ein Zehntel der Emissionen einer Stahlbetonwand und nur ein 24stel einer gleichwertigen Kalksandsteinwand. Bei derart niedrigen Bilanzdaten fällt es schwer weitere Optimierungspotentiale zu finden. Nicht zuletzt deswegen wurde in das weitere Projekt das Thema der Regionalität (vgl. z.B. Kap. 1.1.9) eingebracht, so dass die ökologischen Vorteile nicht mit langen Transportwegen eines vergleichsweise schweren Materials verrechnet werden müssen. In diesem Fall gibt es lokale Tonvorkommen und mit „Conluto“ aus Blomberg auch einen erfahrenen Hersteller bzw. Aufbereiter.

#### Rückbau

Anders als bei Beton oder Kalksandsteinwänden kann eine Lehmwand wie hier schon mehrfach beschrieben als 100% Ressource betrachtet werden. Wie im ursprünglichen Tagebau kann das Material zurückgeführt und nach Reinigung von evtl. Einbauten (Kabeln, vielleicht notwendigen Verstärkungen) erneut aufbereitet werden.

Tabelle A3.7: Ökologischer Vergleich tragende Innenwände

<p>Tragende Innenwand Gleiche Druckfestigkeiten</p>	 <p>⑦ Innenwand tragend</p>															
<p><b>PE ne (MJ)</b></p>  <p>□ Innenwand tragend Kalksandstein ■ Beton Konventionell ■ Innenwand tragend Ökobeton ■ Innenwand tragend Stampflehm</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Innenwand tragend Ökobeton</th> </tr> <tr> <th>Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>300mm Ökobeton mit Bewehrung</td> <td>175</td> </tr> <tr> <td></td> <th>PE e</th> </tr> <tr> <td></td> <td>40</td> </tr> <tr> <td></td> <th>GWP</th> </tr> <tr> <td></td> <td>31</td> </tr> </tbody> </table>	Innenwand tragend Ökobeton		Konstruktionsaufbau	PE ne	300mm Ökobeton mit Bewehrung	175		PE e		40		GWP		31	
Innenwand tragend Ökobeton																
Konstruktionsaufbau	PE ne															
300mm Ökobeton mit Bewehrung	175															
	PE e															
	40															
	GWP															
	31															
<p><b>PE e (MJ)</b></p>  <p>□ Innenwand tragend Kalksandstein ■ Beton Konventionell ■ Innenwand tragend Ökobeton ■ Innenwand tragend Stampflehm</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Kalksandstein Konventionell</th> </tr> <tr> <th>Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15mm Gipsputz</td> <td rowspan="2">660</td> </tr> <tr> <td>300mm Kalksandstein Mix</td> </tr> <tr> <td>15mm Gipsputz</td> <th>PE e</th> </tr> <tr> <td></td> <td>128</td> </tr> <tr> <td></td> <th>GWP</th> </tr> <tr> <td></td> <td>94</td> </tr> </tbody> </table>	Kalksandstein Konventionell		Konstruktionsaufbau	PE ne	15mm Gipsputz	660	300mm Kalksandstein Mix	15mm Gipsputz	PE e		128		GWP		94
Kalksandstein Konventionell																
Konstruktionsaufbau	PE ne															
15mm Gipsputz	660															
300mm Kalksandstein Mix																
15mm Gipsputz	PE e															
	128															
	GWP															
	94															
<p><b>GWP (CO<sub>2</sub> äqv.)</b></p>  <p>□ Innenwand tragend Kalksandstein ■ Beton Konventionell ■ Innenwand tragend Ökobeton ■ Innenwand tragend Stampflehm</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Beton Konventionell</th> </tr> <tr> <th>Konstruktionsaufbau</th> <th>PE ne</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>300mm Beton C25/30 mit Bewehrung</td> <td>269</td> </tr> <tr> <td></td> <th>PE e</th> </tr> <tr> <td></td> <td>51</td> </tr> <tr> <td></td> <th>GWP</th> </tr> <tr> <td></td> <td>57</td> </tr> </tbody> </table>	Beton Konventionell		Konstruktionsaufbau	PE ne	300mm Beton C25/30 mit Bewehrung	269		PE e		51		GWP		57	
Beton Konventionell																
Konstruktionsaufbau	PE ne															
300mm Beton C25/30 mit Bewehrung	269															
	PE e															
	51															
	GWP															
	57															

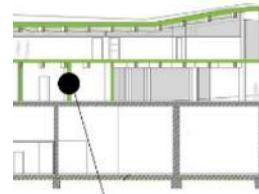
### 3.8 Nicht tragende Innenwand

Für die nichttragende Innenwand wurden die beiden typischen Ausführungen einer konventionellen Gipskarton-Trockenbauwand mit Mineralfaser-Füllung und einer ökologischen Wand mit Lehmbauplatten, Holzfasermatten und Holzständern mit einer massiven Wand aus Lehmziegeln verglichen. Letztere ist vor allem in Hinblick auf Brandschutz konzipiert.

Der Vergleich zwischen den verschiedenen Innenwandaufbauten zeigt für die nicht erneuerbare Primärenergie die deutlichen Vorteile der Leichtbaukonstruktion aus Holz, die mit Lehmbauplatten beplankt ist (Lehmbauwand A). Die Gipskartonleichtbauwand weist aufgrund der Dämmung und des ungünstigeren Herstellungsaufwandes für die Metallständer höhere Werte auf (Tabelle A3.8). Bei der erneuerbaren Primärenergie wird die Lehmbauwand A maßgeblich Anteil von den biotischen Baustoffen in Form von Holz und Holzfaserdämmplatte bestimmt, weswegen hier höhere Werte erreicht werden. Die Lehmbauwand B und die Gipskarton Leichtbauwand zeigen hingegen kaum Anteile erneuerbarer Energien. Erwartungsgemäß ergeben sich für die Trockenbauwand mit Lehmbauplatten auch in der Betrachtung des Treibhauspotentials (GWP) die günstigsten Werte. Bedingt durch die CO<sub>2</sub> einspeichernden Baustoffen erreicht die Lehmbauwand A einen negativen GWP- Wert, der auch durch die Beplankung nicht wieder verbraucht wird – schließlich weist die Lehmbauplatte einen äußerst niedrigen Wert in den CO<sub>2</sub> Emissionen auf im Vergleich zu einer Gipskartonplatte (Tabelle A3.8). Die massiv ausgeführte Version der Lehmbauwand B hat dagegen ähnlich hohe Werte wie die Leichtbau-Gipskartonwand, da die Lehmziegel bei hohen Temperaturen gebrannt werden.

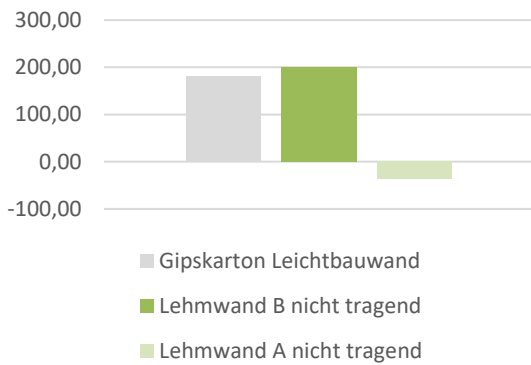
Finanziell bedeuten die ökologische Varianten natürlich einen nicht zu vernachlässigenden Mehraufwand: Während die Gipskartonplatte als Massenware ca. 3 € pro m<sup>2</sup> kostet, liegt die Lehmbauplatte mit etwa 18 € pro m<sup>2</sup> deutlich teurer. Auch hierbei sind allerdings die Randbedingungen zu bedenken: Falls die Gipskartonwand einer akustischen Anforderung genügen soll ist in den meisten Fällen eine doppelte Beplankung notwendig: hierdurch steigen nicht nur die Materialkosten auf 6 € pro m<sup>2</sup> sondern es wird auch ein zweiter Arbeitsschritt notwendig, der bei heutigen Lohnkosten wahrscheinlich mind. zu einer Kostenneutralität führen dürfte. Genauere Angaben hierzu liegen aktuell nicht vor und müssen im weiteren Projektverlauf erarbeitet werden.

# Nichttragende Innenwand

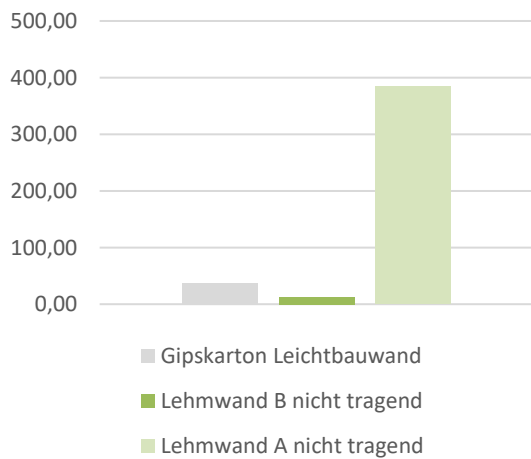


⑧ Innenwand nicht tragend

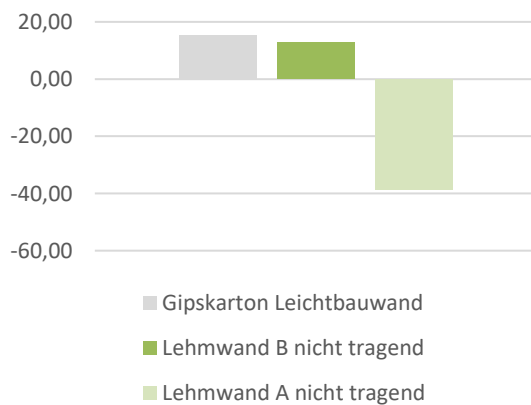
## PE ne (MJ)



## PE e (MJ)



## GWP (CO2 äqv.)



### Lehmwand A nicht tragend

Konstruktionsaufbau		PE ne
5mm	Lehmputz	-37
20mm	Lehmbauplatte	
80mm	Konstruktionsvollholz	PE e
80mm	Holzfaserdämmplatte	385
20mm	Lehmbauplatte	GWP
5mm	Lehmputz	
		-39

### Lehmwand B nicht tragend

Konstruktionsaufbau		PE ne
10mm	Lehmputz	200
120mm	Lehmziegel	
10mm	Lehmputz	PE e
		13
		GWP
		13

### Gipskarton Leichtbauwand

Konstruktionsaufbau		PE ne
12.5mm	Gipskartonplatte	182
100mm	Wandprofil, verzinkt	
100mm	Steinwollgedämmstoff	PE e
12.5mm	Gipskartonplatte	37
		GWP
		15

Tabelle A3.8: Ökologischer Vergleich nicht tragende Innenwände

## **Rückbau**

Während Massivbauweisen nur mit mechanischer Gewalt zurückgebaut, also abgebrochen werden können, besteht im Trockenbau die Möglichkeit eine geordnete Demontage vorzunehmen, die zumindest in der Theorie eine Wiederverwendung der Bekleidungen und Beplankungen erlaubt. In der Praxis sind die Plattenstöße und Schraublöcher in der Regel verspachtelt, so dass man die Verschraubung nicht lösen kann, und der Rückbau nur durch ein Ausbrechen der Platten erledigt werden kann. Verschraubungen in der Konstruktion sind dagegen besser zugänglich, so dass die Tragkonstruktion beider Varianten in der Regel sauber und sortenrein einschließlich der verbauten Dämmung ausgebaut und getrennt werden kann. Ein großes Hemmnis besteht jedoch in der Wirtschaftlichkeit, da die Arbeitszeit für den Rückbau sich finanziell nicht durch die (mögliche!) Wiederverwendung des Materials ausgleichen lässt.

Für Massivbau Varianten bleibt bei bisheriger Bauweise nur die Nachnutzung als Bauschutt mit den üblichen Verwendungsmöglichkeiten (Zuschlag, Schotter o.ä.). Problematisch sind auch die heute überwiegend zum Einsatz kommenden Dünnbettmörtel zw. Kleber. Diese sind unter der Prämisse einer hohen Haftung bei geringem Materialeinsatz entwickelt worden – entsprechend schwer lassen sie sich von den Mauerwerkssteinen entfernen. Speziell bei einem Gasbetonstein verbindet sich der Mörtel optimal mit den Poren des Steines und verhindert so eine einfache Materialtrennung.

Dabei gibt es auch hier durchaus Potentiale: So könnte sowohl der Putz als auch der Mauermörtel aus einem reinen Kalkmörtel bestehen, der sich sandig ablösen lässt und anschließend unter Wasserzugabe wieder zu einem Mörtel aufgerührt werden kann. Die Tragfähigkeit eines derartigen Materials ist zwar begrenzt, aber im Innenbereich und bei nichttragenden Wänden könnte man das in Kauf nehmen.

In Summe wird daher empfohlen, so viele Innenwände wie möglich in der ökologischen Leichtbauvariante mit Lehmbauplatten und einem Holzständerwerk auszuführen.

## **4 Aktuelle Gebäudebilanz**

Für die Gebäudebilanz wurden in erster Linie die bisher ermittelten Bauteile (KG 300) berücksichtigt, die gleichzeitig einen Großteil der gesamten Gebäudemasse ausmachen. Die Bilanz wird ergänzt um die Glasfassade, die zunächst in sich alternativlos ist. Diese wurde als Dreifachverglasung mit Aluminiumpfosten aus der Standardbibliothek der Ökobau.dat entnommen. Aus Zeitgründen wurde darauf verzichtet, die dort enthaltenen Aluminium-Pfosten durch Holz-Pfosten zu ersetzen, wie es in der Realität geschehen wird / geschehen sollte. Zur Erstellung der Bilanz wurde für jedes Bauteil eine sog. konventionelle Lösung, mit der besten Variante aus den vorangegangenen Kapiteln verglichen.

Tabelle A3.9: Gegenüberstellung der für die Gebäudebilanz verwendeten Bauweisen

	Bezeichnung	„konventionell“	In „EcoSights“
100	Grundstück/ Flächenbedarf	nicht bilanziert	
200	Herrichten	nicht bilanziert	
300	Bauwerk/ Konstruktionen		
310	Baugrube	bisher nicht bilanziert	
320	Gründung	Flachgründung Stahlbeton	Flachgründung „Ökobeton“
330	Außenwände - erdberührte AW - tragende AW - nichttragende AW - Stützen Außenwand - Außenfenster - Sonnenschutz	jeweils mit Bekleidungen Stahlbeton-Wand Stahlbeton-Wand Kalksandstein Wand Stahlbeton 3xVergl. mit Aluminiumprofilen	jeweils mit Bekleidungen „Ökobeton“ „Ökobeton“ Massivholz-Wand Stahlbeton 3x Vergl. mit Aluminiumprofilen <sup>1</sup>
		bisher nicht bilanziert	
340	Innenwände - tragende IW - nichttragende IW - elementierte IW - Innentüren	jeweils mit Bekleidungen Stahlbeton-Wand Gipskarton LB-Wand Gipskarton LB-Wand	jeweils mit Bekleidungen Stampflehmwand Lehmtrockenbau-Wand Lehmtrockenbau-Wand
		voraussichtlich gleich- nicht bilanziert	
350	Decken - Stb-Decken - Holzdecken - Treppen	(innen) Stahlbeton-Decken (m <sup>3</sup> ) Stahlbetondecken mit schwimmendem Estrich Stahlbetontreppen (m <sup>3</sup> )	Ökobeton (m <sup>3</sup> ) Massivholzdecken mit Trockenestrich Ökobeton (m <sup>3</sup> )
360	Dächer - Dach Ausstellung - Beton-Dächer	Spannbetonhohldiele Stahlbetondach	Holzfachwerk mit Baustroh Ökobeton-Kassettendecke
370 - 390		bisher nicht bilanziert	
400	Gebäudetechnik	bisher nicht bilanziert	
500	Außenanlagen	voraussichtlich gleich- bisher nicht bilanziert	
600	Ausstattung und Kunstwerke	kaum zu beeinflussen	

<sup>1</sup> Sollte noch gegen Holzelemente getauscht werden(z.B. Fassade von Raico ©)



Die damit vorliegende Gebäudebilanz (Abbildung A3.34) ist eine erste Annäherung an die komplexe Bauaufgabe nach einer ersten, 4 monatigen Forschungsphase. Durch verschiedene Schritte der Optimierung konnten bei den bisher betrachteten Bauteilen und vollständiger Umsetzung ca. 1800 t CO<sub>2</sub> eingespart bzw. in biotischen Bauteilen gebunden werden. Diese Einsparung kann sich durch die hinzukommenden, bisher noch nicht bilanzierten Bauteile noch verändern, zudem sind einige Bauteile wahrscheinlich noch zu grob zusammengefasst. Insbesondere die Haustechnik wird noch einmal für veränderte Wirkbilanzen in der Bilanz der Herstellungsphase sorgen. Die weitere Ergänzung bietet aber auch die Chance, für andere Baugruppen ebenfalls optimierte Lösungen zu finden und so in den notwendigen Baumaßnahmen immer die nachhaltigste Lösung zu suchen.

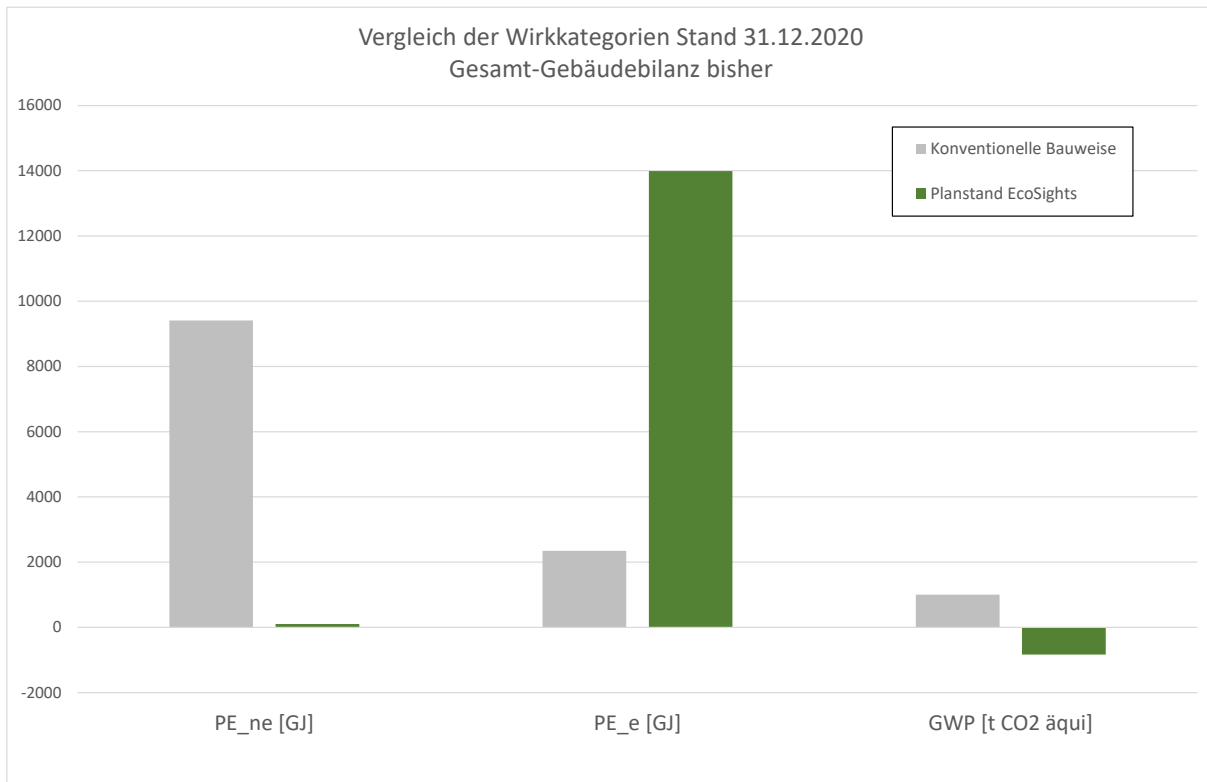


Abbildung A3.34: Vorläufige Gesamtbilanz des Gebäudes